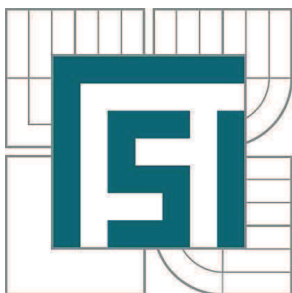


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

NÁVRH ŘÍZENÍ OSY S LINEÁRNÍM MOTOREM

DESIGN OF CONTROL OF AXIS WITH LINEAR MOTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ROMAN CHALOUPKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN VETIŠKA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Roman Chaloupka

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh řízení osy s lineárním motorem

v anglickém jazyce:

Design of control of axis with linear motor

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřená na návrh mechanického a elektrického uspořádání posuvové osy s lineárním motorem. Součástí práce je návrh řídicího SW.

Cíle diplomové práce:

1. rešerše lineárních motorů v obráběcích strojích
2. návrh mechanického uspořádání lineární osy s lin. motorem
3. návrh elektrického uspořádání lineární osy s lin. motorem
4. návrh řídicího SW

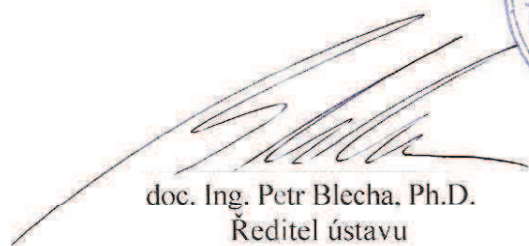
Seznam odborné literatury:

Y. Altintas¹ (1), C. Brecher², M. Weck² (1), S. Witt², Virtual Machine Tool
Valášek, Michael, Dynamika robotických systémů
Marek, Jiří, Konstrukce CNC obráběcích strojů

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Vetiška, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.


V Brně, dne 24.11.2014



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 3
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

ANOTACE

Tato práce se zabývá konstrukcí, zapojením a řízením osy s lineárním motorem. Začátek práce je zaměřen na princip fungování a vlastnosti lineárních motorů. V následující části jsou popsány použité komponenty osy, jejich mechanické uspořádání a elektrické zapojení. Dále práce pojednává o vytvoření PLC programu a uživatelského rozhraní pro řízení osy v systému TwinCAT. V poslední části je řešeno správné softwarové nastavení osy.

Klíčová slova


Lineární motor, lineární osa, PLC, řízení osy, TwinCAT

ANNOTATION

This thesis deals with construction, connection and control axis with linear motor. The beginning of thesis is focused on principle of functioning and characteristics of linear motors. The following part describes used components of axis, their mechanical configuration and electrical wiring. Further thesis deals with creating PLC program and user interface for control axis in TwinCAT system. In last part is dealing correct software settings of axis.

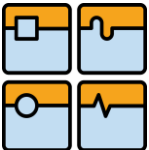
Key words

Linear motor, linear axis, PLC, axis control, TwinCAT

Str. 4	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHALOUPKA, R. *Návrh řízení osy s lineárním motorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vetiška, Ph.D..


	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Návrh řízení osy s lineárním motorem“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

27. května 2015

.....
Roman Chaloupka


Str. 6	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Vetiškovi, PhD. za odborné vedení, poskytnutou pomoc a cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

OBSAH

ANOTACE	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 LINEÁRNÍ MOTORY	9
1.1 Princip lineárních motorů	9
1.2 Výhody a nevýhody lineárních motorů	10
1.3 Typy lineárních motorů	12
1.3.1 Asynchronní lineární motory	12
1.3.2 Synchronní lineární motory	13
1.3.3 Tubulární lineární motory	16
1.3.4 Krokové lineární motory	16
1.4 Příslušenství	17
1.4.1 Mechanické vedení	17
1.4.2 Odměřovací systém	18
1.4.3 Řídící systém	18
1.5 Výrobci lineárních motorů	19
1.5.1 HIWIN s.r.o.	19
1.5.2 VUES Brno	19
1.5.3 Beckhoff	19
1.5.4 FANUC	20
1.6 Příklady aplikace lineárních motorů	20
1.6.1 Mazak Hyper Variaxis 630	20
1.6.2 Sodick VZ300L	20
2 KONSTRUKCE LINEÁRNÍ OSY	21
2.1 Lineární motor	21
2.2 Vedení	23
2.3 Odměřovací systém	24
2.4 Konstrukční uspořádání	27
2.4.1 Původní stav lineární osy	27
2.4.2 Model lineární osy	27
2.4.3 Nosná pohyblivá část	28
2.4.4 Základ osy	29
2.4.5 Čela osy	30
2.4.6 Energetický řetěz	31
3 ELEKTRICKÉ ZAPOJENÍ LINEÁRNÍ OSY	32
3.1 Průmyslové PC C6925	33
3.2 Servořízení	33
3.2.1 Princip servořízení	33

Str. 8	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

3.2.2 EtherCAT	34
3.2.3 Servoměnič AX5106	35
3.3 Propojovací krabice a kabeláž.....	37
4 ŘÍDÍCÍ SYSTÉM	39
4.1 Klasické a softwarové PLC.....	39
4.2 TwinCAT	40
4.2.1 Moduly TwinCAT	41
4.2.2 TwinCAT System Manager	42
4.2.3 TwinCAT PLC Control.....	43
4.3 PLC program pro řízení osy	47
4.3.1 Knihovny	48
4.3.2 Datové typy.....	49
4.3.3 Konstrukce PLC programu.....	50
4.3.4 Ruční řízení osy	53
4.3.5 NC řízení osy	55
4.4 Nastavení system manageru.....	59
4.4.1 Konfigurace TwinCAT systému	59
4.4.2 Konfigurace vstupů a výstupů	59
4.4.3 Konfigurace NC	60
4.4.4 Konfigurace PLC.....	61
5 POKUS O OŽIVENÍ OSY	62
ZÁVĚR	64
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....	68
SEZNAM TABULEK	69
SEZNAM PŘÍLOH	70

ÚVOD

Lineární posuvové mechanismy jsou dnes náročnější, než kdy dřív. Rychlejší pohyb, přesnější polohování, menší údržba, delší životnost, co nejmenší rozměry, atd. Seznam požadavků na posuvové mechanismy je nekonečný. Aby výrobci lineárních posuvových mechanismů udrželi krok s konkurencí a vyhověli současným požadavkům, je třeba kontinuálního technologického pokroku a buď zlepšovat stávající lineární systémy, nebo vyvíjet nové způsoby lineárních posuvů. Možnosti klasických rotačních motorů s mechanickým převodem z rotačního pohybu na pohyb lineární jsou v řadě aplikací používány na mezi dynamiky. Lineární motory nemají převod, jedná se o přímý pohon a odpadají u něj nevýhody spojené s převodem.

Lineární motory jsou dnes považovány za jednu z nejvíce inovativních technologií v oblasti pohonu pro manipulační a automatizační systémy. Základní princip lineárního motoru byl popsán v patentu už v roce 1885 Dr. Th. Burgerem v Berlíně. To znamená, že je to téměř 130 let stará technologie. Praktické zařízení nebyly vyvinuty až do roku 1947, kdy britský profesor Eric Laithwaite začal uvažovat nad praktickým využitím lineárních motorů v elektrických tkacích strojích a v Imperial College v Londýně vytvořil první plně fungující model.

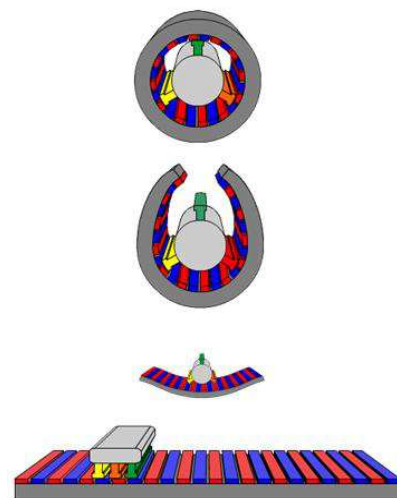
K velkému rozvoji praktického uplatnění a výroby lineárních motorů došlo až v minulém desetiletí. Umožnil to hlavně technologický vývoj. Dříve byl problém najít komerčně dostupné lineární ložisko, které by se mohlo pohybovat 5m/s s potřebnou přesností a tuhostí. Dnes existuje mnoho těchto ložisek splňující tyto požadavky, a jsou poměrně efektivní s hlediska nákladů. Další rozvoj umožnily stále se vyvíjející elektronické prvky umožňující plynulé řízení rychlosti a pokrok v technologii lineárního odměřování zpřesňují polohování celého systému. To vše poskytuje prostor pro využívání potenciálu lineárních motorů.

1 LINEÁRNÍ MOTORY

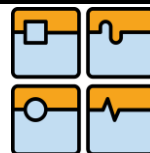
1.1 Princip lineárních motorů

Princip lineárních motorů si lze představit jako klasický synchronní nebo asynchronní motor s rozvinutým statorem i rotorem do roviny, jak je ukázáno na obr. 1. Přičemž zde platí stejné elektromechanické principy. Elektromagnetická síla, která vytváří točivý moment v rotačním motoru, vytváří posuvovou sílu v lineárním motoru. Díky tomu lineární motor využívá stejné ovládací prvky a programové vybavení, jako motor rotační. [1, 4]

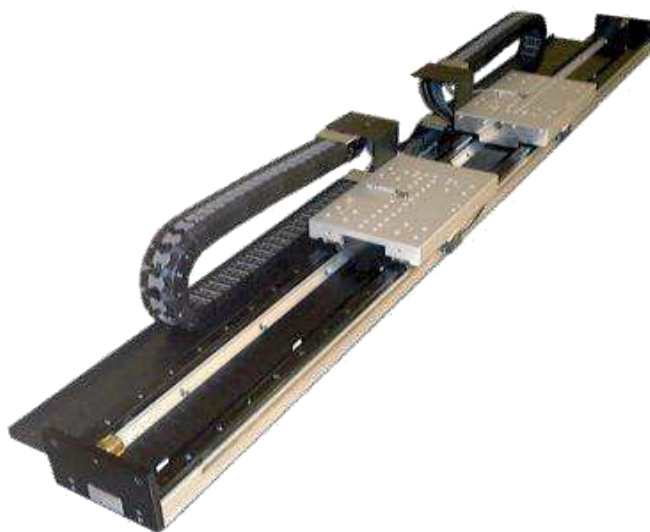
Lineární motor se skládá ze dvou částí. Kratší část se nazývá primární díl nebo také primár či jezdec, a je tvořena trojfázovým vinutím, které je uloženo v drážkách magnetického obvodu z plechů. Delší část se nazývá základna, sekundární díl či sekundár, a obvykle se skládá z ocelové podložky s nalepenými permanentními magnety z vzácných zemin (výhradně Nd-Fe-B). [3, 7]



Obr. 1 Princip lineárního motoru [6]



Existují dvě konstrukční řešení rozhodující, která část se bude pohybovat. První řešení zahrnuje pevný sekundární díl a pohyblivý kratší primární díl, a druhé, kde je pevný primární díl a pohyblivý sekundární díl. V naprosté většině případů se pohybuje primární díl po dráze složené z libovolného počtu sekundárních dílů. Toto provedení ovšem vyžaduje pohyblivý napájecí kabel, kabel snímače polohy a případně i přívod a odvod chladicí kapaliny. Tento kabel musí být dostatečně pohyblivý a chráněný proti mechanickému poškození. Díky dlouhému sekundárnímu dílu také nic nebrání tomu, aby na něm bylo umístěno více pohyblivých primárních dílů, pohybujících se nezávisle na sobě, a zvýšit tak únosnost celého mechanismu. [2, 5]



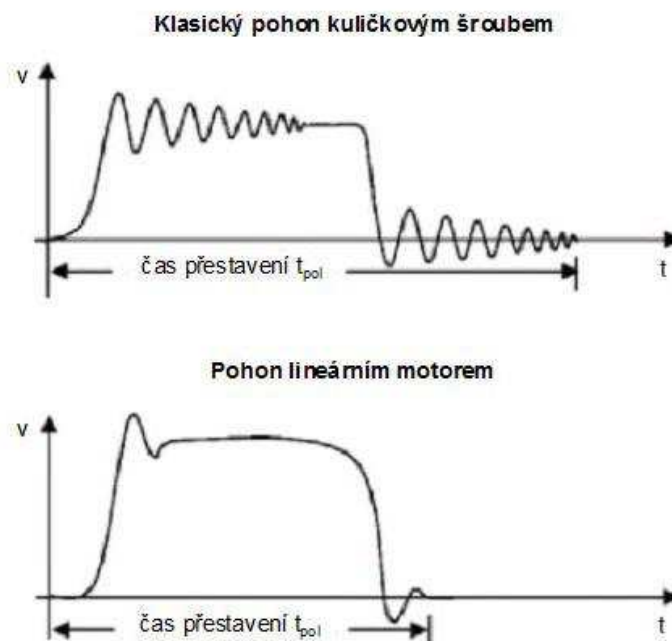
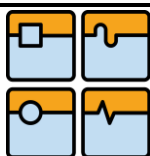
Obr. 2 Dvojice lineárních motorů [8]

1.2 Výhody a nevýhody lineárních motorů

Hlavní rozdíl oproti klasickým způsobům lineárních posuvů, jako jsou například kuličkové šrouby nebo pastorek a hřeben, je, že neobsahuje žádné převody, které převádějí rotační pohyb na posuvový. Tím je výrazně snížena mechanická složitost a lineární motory tudíž nejsou omezovány vloženým převodem a mohou tak dosahovat velmi vysokých rychlostí. Typická rychlost se pohybuje mezi 3 až 5 m/s. Maximální rychlost dosahuje hodnot až 45 m/s. Vzhledem k tomu, že lineární motory lze urychlit a pohybovat s nimi velmi rychle, musíme brát ohledy na řídicí systém, který musí být schopen uřídit tak rychlý pohyb. [9, 10, 11]

Přesnost polohování a opakovatelnost zařízení, které je poháněno lineárním motorem, je určováno zpětnovazebním zařízením čili odměřováním. Přesnost polohování v závislosti na použitém odměřovacím systému je i méně než 1 μm a opakovatelnost polohování se pohybuje mezi 2 až 7 μm .

Protože neexistuje žádný mechanický převod, lineární motory zajišťují chod bez vůlí, mají dlouhou životnost, nízké nároky na údržbu, malé zástavbové rozměry, jsou také velice tiché a mají vysokou účinnost. Rychlost odezvy může být lineárního motoru více než 100 krát vyšší než u mechanismů s převodem. To znamená rychlejší akceleraci a kratší časy na ustálení zařízení v požadované pozici.



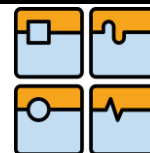
Obr. 3 Porovnání ustavení zařízení [13]

Bez mechanické vazby je zvýšení tuhosti otázkou zesílení proudu. Tuhost tak může být i několikrát vyšší než u mechanismů s převodem. Nicméně je to omezeno maximální silou, jakou je schopen motor snést. [9, 11, 14]

Lineární motory mají samozřejmě i svoje nevýhody. Jednou z nich je cena. Oproti jiným posuvovým mechanismům je lineární motor dražší variantou. Je to způsobeno momentálně relativně nízkým objemem výroby. Popularita těchto pohonů roste, a jak bude objem výroby vzrůstat, tak se bude cena snižovat. Dalším aspektem ovlivňující cenu jsou permanentní magnety, které jsou ze vzácných zemin, a náklady na tyto magnety jsou vysoké, obzvláště je-li potřeba dlouhý sekundární díl. Musíme vzít v úvahu i lineární odměřování pro zpětnou vazbu. Zpětné vazby pro rotační motory jsou relativně levné, kdežto jejich lineární protějšky jsou mnohem dražší. Protože mají lineární motory velice rychlou odezvu, tak abychom je byli schopni uřídit, jsou kladeny vyšší požadavky na řídicí systém a tím i na jeho cenu. Ale s novými technologiemi cena lineárních motorů klesá. [9]

Dalším problémem lineárních motorů je přitažlivá síla k magnetům na vedení, je zpravidla třikrát až desetkrát vyšší než síla vytvářející tah. Tento tah může poškodit vedení, a při malých posuvových rychlostech může mít vliv na plynulost chodu a způsobovat takzvaný cogging (viz. 1.3.2.1). Lze to řešit jednak speciální konstrukcí motoru bez feromagnetických materiálů (viz. 1.3.2.2), která přitlačnou sílu výrazně snižuje, ovšem snížení této síly má vliv na tuhost celého mechanismu. Nebo to lze řešit i větším počtem menších motorů na jednom vedení. [12]

Nevýhodou je právě i absence zmíněného vloženého převodu. Například kuličkový šroub je sám osobě převodem do pomala, vlivem vloženého převodu se přeměnění otáčky slabšího servomotoru na tažnou sílu matice. Lineární motor si takto pomocí nemůže a musí tak všechnu tažnou sílu vyvinout sám. Z toho vyplývá, že je nasazovaný v aplikacích, kde jsou potřeba menší tažné síly, ale velmi vysoké rychlosti. [13, 14]



I nízké zástavbové rozměry mohou působit problémy. Jako všechny motory i lineární motor produkuje ztrátové teplo. Ve většině aplikací je zátěž přímo připojena k motoru, a je-li zátěž citlivá na teplo, je nutné přebytečné teplo odvádět pryč. Když nestačí chlazení vzduchem, lze použít vodní chlazení. [9]

Při výpadku elektrické energie nastává problém s ovládáním zpomalení motoru. V tomto případě lineární motory zpomalují jen za pomoci tření, což nemusí být dostatečné a může dojít k poškození zařízení. Vedení s permanentními magnety je tomto ohledu výhodné, protože bez proudu zpomalí asi na třetinu rychlosti, dosažené pod proudem. Kvůli tomuto problému někteří výrobci přistoupili k instalaci tlumičů nárazu. [12]

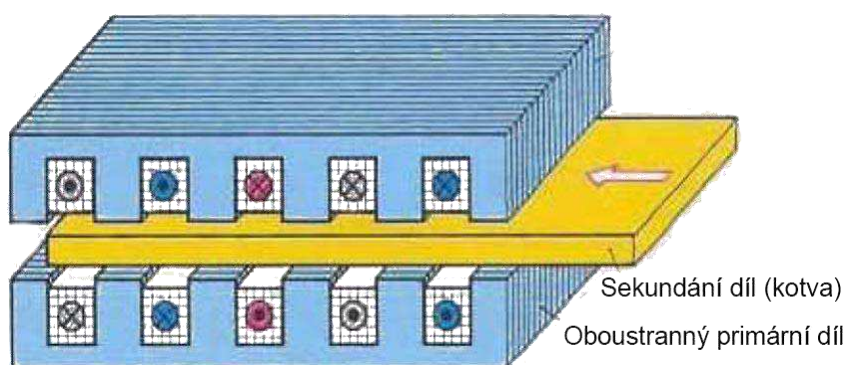
Lineární motory mají vysoký únik magnetického toku. Musí se proto dbát na bezpečnost při manipulaci s nimi. Vlivem magnetického toku mohou být vtaženy magnetické předměty do motoru, může také poškodit citlivé zařízení např. kardiostimulátor. [9, 12]

1.3 Typy lineárních motorů

Koncepce lineárního motoru se ukázala být velice univerzální, avšak jednotlivé typy se mohou značně lišit.

1.3.1 Asynchronní lineární motory

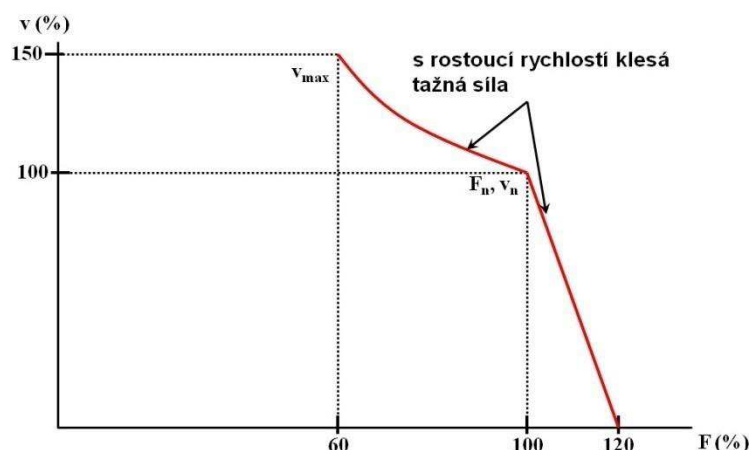
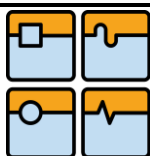
Princip lineárního asynchronního motoru (LAM) je stejný jako u třífázových rotačních asynchronních motorů. Místo rotujícího magnetického pole využívá postupující magnetické pole. Primární díl tvoří trojfázové vinutí uložené v drážkách z elektrotechnických plechů. Sekundární díl tvoří klec na krátko, která je jednodušší a hlavně levnější než sekundární díl u lineárních synchronních motorů. Klec na krátko může být tvořena, jako klecové vinutí uložené do drážek, nebo jako hliníkový či měděný pás připevněný na ocelové podložce. Primární díl může být proveden buď jednostranně, nebo oboustranně, kde je vinutí uloženo po obou stranách sekundárního dílu, což zajišťuje vyrovnaní radiálních sil. [3, 5, 7]



Obr. 4 Princip lineárního asynchronního motoru [7]

V kotvě se působením magnetického postupného pole, indukují vířivé proudy, jejichž směr proudů je takový, že působí proti postupnému poli. Vzniká tak síla, která produkuje tah.

Výhodou těchto motorů je možnost napájení bez měniče kmitočtu, přímo ze standardní rozvodné sítě. Zastavení je potom provedeno vypnutím elektrické energie nebo koncovým vypínačem. [5, 7]



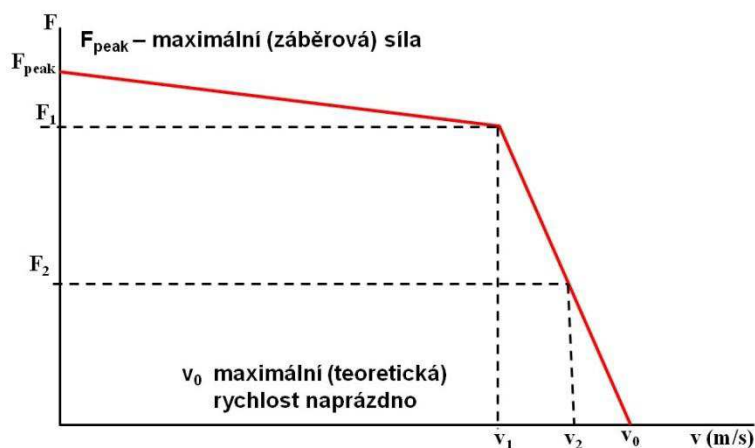
Obr. 5 Mechanická charakteristika LAM [7]

Menší motory najdou využití k otevírání a zavírání dveří, závor, šoupátek, apod. Větší lze výhodně použít pro jeřáby, průmyslové manipulátory, podavače, brány, také pro dopravu, kde sekundární díl je kolej a primární díl je ve vozidle. Lze je také využít pro čerpání tekutých kovů, v tomto případě tvoří primární díl trubka s vinutím a sekundární díl je přímo roztavený kov. [2, 3, 7]

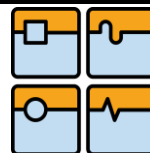
1.3.2 Synchronní lineární motory

Lineární synchronní motory (LSM) pracují na principu synchronních motorů buzených permanentními magnety. Primární díl obsahuje vhodně rozložené trojfázové vinutí, a pohybuje se podél stojící sekundární části tvořené permanentními magnety typu Nd-Fe-B se špičkovými magnetickými parametry. Tyto magnety jsou nalepeny střídavě na ocelovou desku. Tažná síla vzniká průtokem elektrického proudu trojfázovým vinutím. Tato síla odpovídá synchronnímu momentu rotačního synchronního motoru s permanentními magnety. [1, 5]

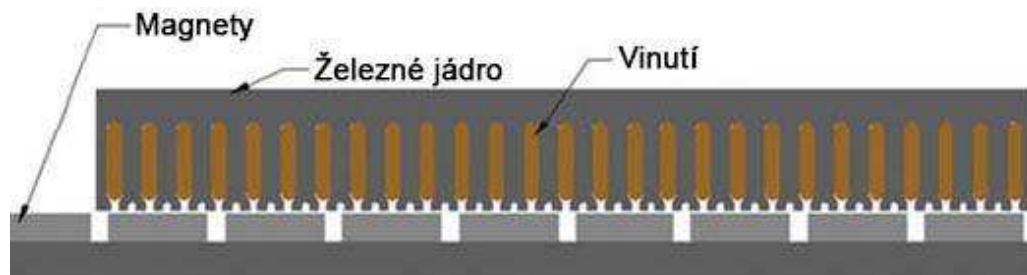
K napájení těchto lineárních motorů jsou využívány stejné zdroje, jako pro napájení rotačních motorů, čili z měničů frekvence s napěťovým meziobvodem se zpětnou vazbou od snímače polohy. Rychlost synchronního lineárního motoru je dána pólovou roztečí a řídicí frekvencí. [3, 7]



Obr. 6 Mechanická charakteristika LSM [7]



Se železným jádrem

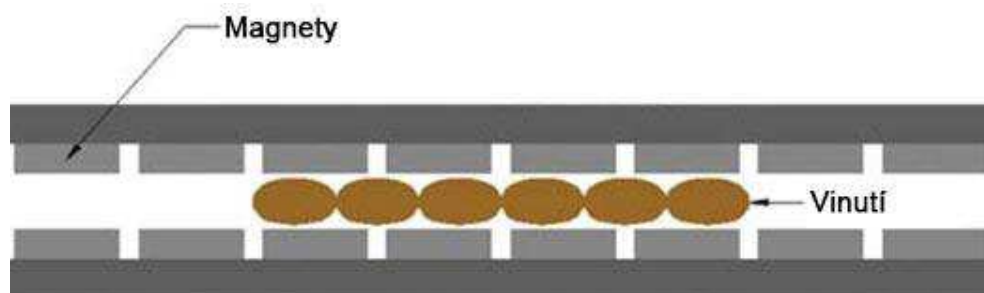


Obr. 7 LSM se železným jádrem [15]

Primární díl je u tohoto lineárního synchronního motoru tvořen z plechů, a v jeho drážkách je umístěno trojfázové vinutí. Pohybuje se nad jednou řadou permanentních magnetů. Železné jádro výrazně zvyšuje sílu motoru. Tento typ má největší sílu ze synchronních motorů. Vzhledem k tomu, že vinutí jsou navinuta v železných drážkách, má výborný odvod tepla, a v drážkách mohou být přímo umístěny chladicí kanálky.

Mezi železným jádrem a magnety vzniká velká síla, a může být i 10krát vyšší než síla tažná. Tuto sílu musíme brát v úvahu při dimenzování lineárního ložiska, aby nedošlo k jeho poškození. Vlivem této síly může vznikat i takzvaný cogging. Když železný primární díl projíždí nad jednotlivými magnety, tak to může způsobovat pulsaci tažné síly a ovlivňovat tak plynulost chodu. Tento jev vzniká hlavně při nízké rychlosti. [4, 9, 15]

Bez feromagnetických materiálů



Obr. 8 LSM bez feromagnetických materiálů [15]

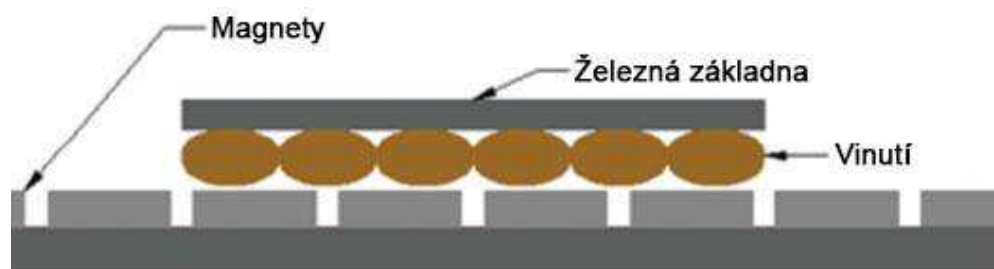
Tato konstrukce se také nazývá aircore, ironless nebo U-channel. Sekundární díl je tvořen dvěma paralelními řadami permanentních magnetů, umístěných proti sobě. Distanční tyč udržuje obě strany oddělené od sebe, a mezi nimi se pohybuje primární díl. Primární díl je vyroben z navinutých cívek, které jsou spojeny epoxidem. Toto vinutí je zakončeno hliníkovým základem, ten slouží pro zpevnění vinutí a pro odvod tepla.

Vzhledem k tomu, že primární díl neobsahuje železo, a je umístěn mezi dvěma sekundárními díly, neexistují žádné přitažlivé síly mezi primárním a sekundárním dílem. Takže na ložiska není kladeno žádné další zatížení. Motor je snadnější na ovládání. Primární díl je velice lehký a díky tomu dosahuje velkých zrychlení. Kvůli absenci přitažlivých sil, nevzniká u této konstrukce žádný cogging. Motor je tak ideální pro aplikace, které vyžadují vysokou kontrolu nad rychlostmi.

Protože jsou magnety proti sobě, je tato konstrukce vhodná pro snížení úniku magnetického toku.

Vzhledem k tomu, že je primární díl vyroben pouze s cívek a epoxidu a síla je vytvářena v cívkách, znamená to, že všechny síly působí jen na vinutí a epoxid. V porovnání s LSM se železným jádrem, je strukturální tuhost této konstrukce malá, to omezuje velikost motoru a maximální síly, jaké na něj mohou působit. Má také horší odvod tepla, protože teplo vyprodukované v cívkách musí nejprve přejít do hliníkového základu a poté ven z chladiče. Teplo také prochází vzduchovou mezerou do lišt s magnety a vysoká tepelná odolnost zhoršuje chlazení motoru. Nevýhodou je také vyšší cena, protože potřebujeme dvě řady magnetů místo jedné. [4, 9, 15]

Ploché



Obr. 9 Plochý LSM [15]

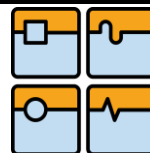
Plochý lineární synchronní motor, neboli také slotless, je hybrid mezi LSM se železným jádrem a LSM bez železa. Primární díl se skládá z cívek a železné základny, která je umístěna za cívkami. Tato sestava je umístěna do hliníkové skříně s otevřeným dnem. Hliníková skříň je vyplněna epoxidem k zajištění vinutí a železné základny. Existuje i varianta bez železné základny. Sekundární díl je stejně, jako u LSM se železným jádrem, tvořen z jedné řady magnetů.

Jelikož ploché LSM jsou kombinací dvou předcházejících konstrukcí, tak i jejich vlastnosti se pohybují někde mezi nimi. Motor potřebuje jen jednu magnetickou dráhu, což snižuje cenu. Díky hliníkové skříni poskytuje lepší strukturální tuhost, než LSM bez železa, a motor může být více zatížen. Hliníková skříň také poskytuje lepší odvod tepla. Plochý LSM bez železné základny nevytváří velkou přitlačnou sílu, samozřejmě neposkytuje tak velkou tažnou sílu, jako plochý LSM se železnou základnou. Ten sice vyvíjí přitlačnou sílu a způsobuje cogging, ale přitlačná síla je 5krát až 7krát menší než u LSM se železným jádrem, takže ovládání rychlosti je mnohem lepší. [4, 9, 15]

Srovnání lineárních synchronních motorů

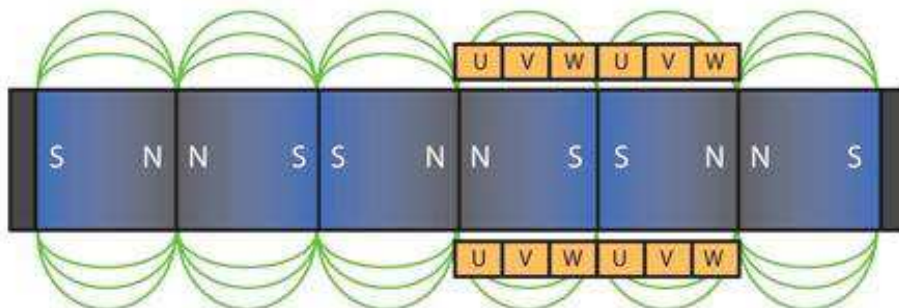
Tab. 1 Srovnání lineárních synchronních motorů [9, 15]

LSM	Se železným jádrem	Bez železa	Plochý
Cena	Nízká	Vysoká	Nejnižší
Tažná síla	Nejvyšší	Nejnižší	Střední
Přítlačná síla	Nejvyšší	Není	Střední
Váha prim. dílu	Nejvyšší	Nejnižší	Střední
Cogging	Nejvyšší	Není	Střední



1.3.3 Tubulární lineární motory

Tyto motory byly mezi prvními, které si našly cestu do komerčních aplikací. Tubulární lineární motor pracuje na stejném principu jako lineární synchronní motor. Primární část je ale v tomto případě pevná a obsahuje třífázové vinutí uložené v pouzdru z nemagnetické oceli. Pouzdro také obsahuje kluzné ložisko, ve kterém se pohybuje tyč s permanentními magnety. Existuje i varianta, kde se sekundární díl s permanentními magnety nepohybuje, a primární díl se pohybuje podél něj.



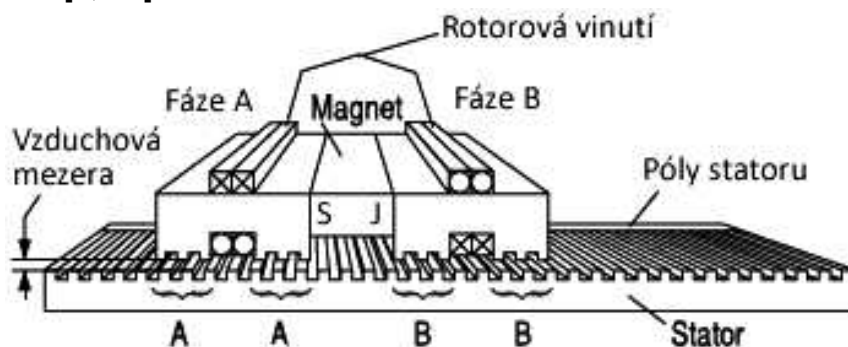
Obr. 10 Tubulární lineární motor [16]

Rotačně symetrické uspořádání kompenzuje přitažlivé síly mezi primárním a sekundárním dílem a zajišťuje rovnoměrné působení síly po obvodu válce, takže výsledná radiální síla je nulová a tažná síla je bez pulzací. Tyto motory využívají pro polohování Hallovovy sondy, takže není potřeba přidávat externí snímač polohy.

Použití pohonů s tubulárními lineárními motory je vhodné zejména pro přesné přísuvy vyvrtávacích automatů, přísuvy obráběcích strojů, regulované pohony ventilů, šoupátek, apod. [4, 5, 16]

1.3.4 Krokové lineární motory

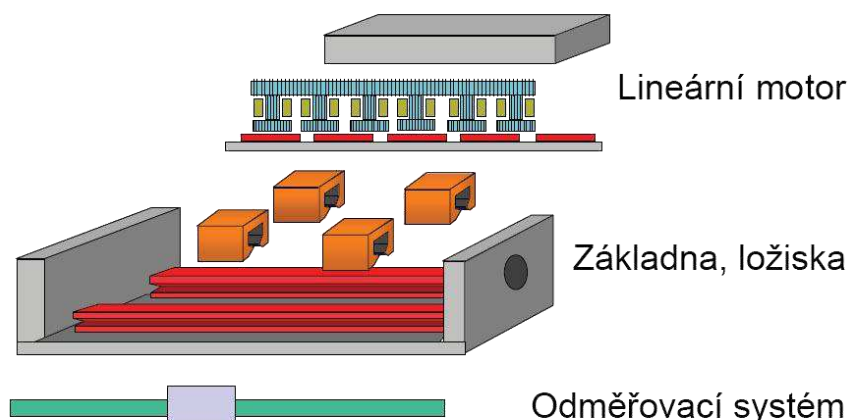
Lineární krokový motor může podle způsobu napájení být dvojfázový nebo trojfázový. Princip je opět obdobný, jako u rotačních krokových motorů. Rotor je změněn na stator, nepohyblivou ozubenou přímou dráhu, a po něm se pohybuje jezdec, který se skládá z ocelových jader s dvojfázovým nebo trojfázovým vinutím, mezi jádry je vložen permanentní magnet. Pólové nástavce jezdce mají ozubení se stejnou pólovou roztečí jako stator, jsou však o čtvrtinu rozteče přesazeny. Pro řízení platí stejné podmínky, jako pro rotační krokové motory. Jezdec se vždy nachází v poloze, kde je největší hodnota magnetického pole. Rovněž je zde možnost polovičního kroku a mikrokrokování. Používá se zřídka, třeba pro polohování menších zátěží. [3, 17]



Obr. 11 Krokový lineární motor [17]

1.4 Příslušenství

Aby byl lineární pohon provozu schopný, je třeba ho ještě doplnit o další komponenty. K základním prvkům, vlastnímu lineárnímu motoru a napájecímu zdroji, přistupují ještě mechanické vedení, přídatné chladiče, pohyblivá kabeláž a zabezpečovací prvky, jako mechanické dorazy a krytování. Jelikož drtivou většinu lineárních pohonů tvoří pohony regulované, patří k příslušenství ještě řídicí systém a odměřovací systém neboli snímání polohy. Lineární motory jsou většinou dodávány jako kompaktní celky nebo společně s příslušenstvím tvoří stavebnici. [5]



Obr. 12 Příslušenství lineárního motoru [18]

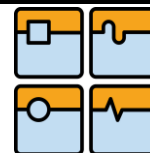
1.4.1 Mechanické vedení

Typicky, lineární ložiska musí být vybírány na základě splnění jistých kritérií. Jako jsou statická a dynamická únosnost, vysoké rychlosti a zrychlení, dlouhá životnost, vysoká přesnost, nízké náklady na údržbu, vysoká tuhost a nízká hlučnost. Další faktory mohou být například zástavbový prostor, montážní přesnost a tepelná roztažnost. [5, 18] Doporučení pro orientační volbu mechanického vedení:

Tab. 2 Přehled mechanických vedení podle rychlostí [3]

Do rychlosti	Mechanické vedení
0,5 m/s	Kluzné kovové plochy
1 m/s	Kuličková pouzdra se smykovým třením
10 m/s	Lineární kuličková nebo válečková ložiska (valivé tření)
20 m/s	Keramické kluzné plochy nasycené např. teflonem
100 m/s	Vzduchová nebo magnetická ložiska

V praxi jsou nejoblíbenější kluzná ložiska, dále valivá a vzduchová ložiska. Pro aplikace s nižšími nároky na nosnost a přesnost jsou vhodné kluzná ložiska. Systémy založené na valivých ložiskách vykazují dobrou tuhost, vynikající únosnost a také velice dobrou přímost a rovinnost po celé jejich délce. Vzduchová ložiska zaručují maximální výkonnost. Nemají prakticky omezení rychlosti a zrychlení, bez třecích sil. Vzduchová ložiska se používají pro aplikace s vysokou přesností. [18]



1.4.2 Odměřovací systém

Odměřovací systém polohy je neodmyslitelnou částí lineárního pohonu, jsou na něj kladeny větší požadavky než na rotační pohony. Existuje celá řada metod pro lineární polohovou zpětnou vazbu pohybu. Například pastorek a hřeben, potenciometry, laserové interferometry, apod. Každý z nich má vlastní úroveň přesnosti a nákladů. Zdaleka nejvíce populární zpětnovazební zařízení pro lineární polohování motoru je lineární snímač.

Většina lineárních snímačů pracuje na principu, kde se čtecí hlava pohybuje po lineární stupnici, a poskytuje pulsy, které odpovídají rozlišení na stupnici. Tyto pulsy se počítají a jejich počet udává informaci o docílené poloze. Pro lineární motory se nejvíce používají dva typy snímačů, optické a magnetické.

Optické snímače pracují na fotoelektrickém principu. Optický odměřovací systém pracuje buď na principu odrazu světelného paprsku, nebo na jeho přerušování. Používá se systém optické mřížky (vypálené rysky do stupnice ze slitiny Fe-Ni), která při průchodu motoru přerušuje nebo odráží optický paprsek, ten je následně převáděn na elektrické signály. Optické odměřovací systémy mohou mít extrémně vysoké rozlišení, jsou schopny poskytovat zpětnou vazbu v řádech nanometrů.



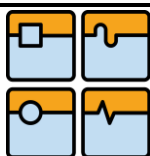
Obr. 13 Optický odměřovací systém [19]

Magnetické odměřovací systémy používají indukční snímací techniku a nabízejí ekonomičtější řešení odměřování než optické snímače, mají ale nižší přesnost a rozlišení, asi 1-10 μm . Princip je obdobný jako u optických snímačů. Nosná páska s tenkou vrstvou namagnetované stupnice je nalepena na kolejnici nebo je integrován do kolejnice. Snímací hlava převádí záznam opět na elektrické pulsy. [3, 6, 18]

Nejnovější konstrukce odměřovacích systémů mají analogový výstupní signál, na místo jednotlivých impulsů, ve tvaru sinusovém, kosinusovém a jejich opačných funkcí. Tyto signály mohou být navíc ještě interpolovány, a dosáhnou tak velmi jemného rozlišení, až desítky nanometrů. Signál je používán nejenom k určení polohy motoru, ale i jeho rychlosti a zrychlení. [3, 18]

1.4.3 Řídicí systém

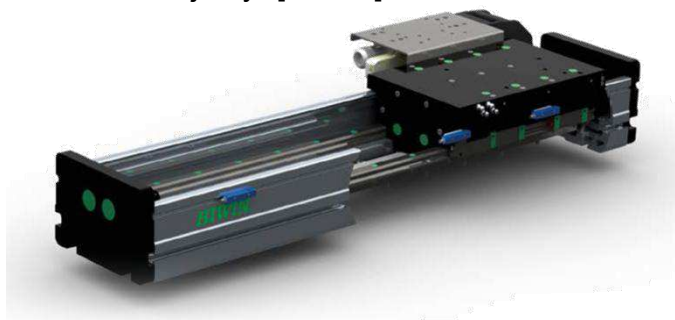
Pro řízení lineárních motorů se používají číslicové regulátory. Základní jsou tři zpětné vazby, vnitřní proudová, střední rychlostní poskytující informace o rychlosti motoru a vnější polohová udávající pozici motoru. Do obvodu bývá v některých případech vložena ještě regulace zrychlení. Motor řídící instrukce systému nepřímá jen pasivně, ale komunikace mezi lineárním motorem a řídicím systémem je obousměrná. Kromě již zmíněných informací o poloze, rychlosti, zrychlení a procházejícím proudu poskytuje informace o svém stavu. Snímá teplotu a napětí, signalizuje přetížení a výpadek ze synchronismu. [5]



1.5 Výrobci lineárních motorů

1.5.1 HIWIN s.r.o.

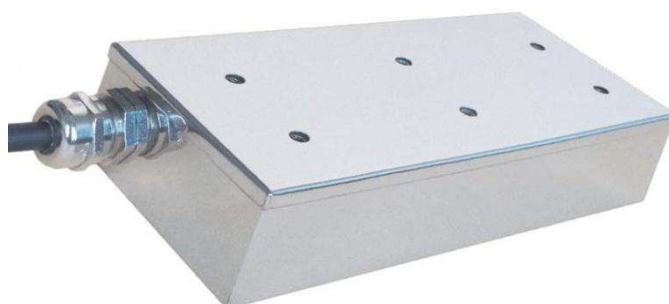
Mezinárodní firma HIWIN s českým zastoupením vyrábí synchronní i asynchronní lineární motory s železným jádrem i bez něj. Nabízí i kompletní polohovací osy s lineárním motorem a volitelnými komponentami. Pro komunikaci polohovací osy s lineárními motory, HIWIN nabízí řídicí kartu PCI4P a software HIWIN Motion Maker, se kterým lze zkontrolovat, zda je logika a zapojení v pořádku, a lze také realizovat zkušební jízdy. [20, 21]



Obr. 14 Lineární osa řady LMU160 [21]

1.5.2 VUES Brno

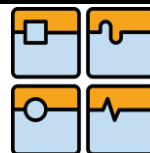
Česká firma VUES Brno nabízí synchronní lineární motory o síle 50 až 16000N a motory se zvýšeným stupněm krytí IP67. Dále vyrábí motory s neželezným jádrem o špičkových silách 80 až 1900N a asynchronní motory o špičkových silách 100 až 500N. VUES Brno bohužel nenabízí žádné vybavení pro napájení či komunikaci s motorem. [22]



Obr. 15 L7S s krytím IP67 [22]

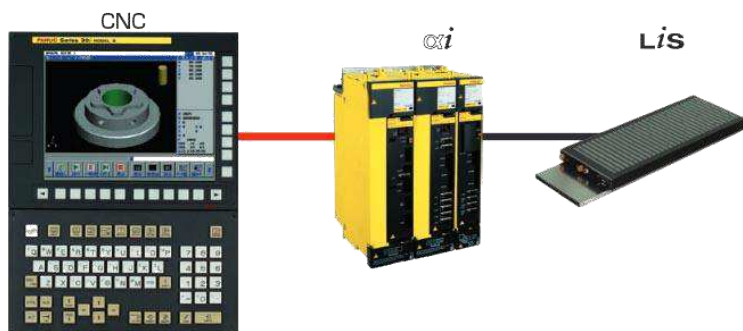
1.5.3 Beckhoff

Firma Beckhoff, se sídlem v Německu, vyrábí synchronní lineární motory se železným jádrem řady AL2xxx i bez železného jádra řady AL3xxx. K lineárním motorům Beckhoff nabízí speciální zpětnou vazbu, kde čtecí hlava je umístěna přímo u motoru, a jako stupnice jí slouží přímo permanentní magnety sekundárního dílu. Beckhoff vyrábí všechny potřebné komponenty pro provoz motorů. Průmyslové PC, sběrnice I/O, řídicí jednotky. Vyvinul také software TwinCAT pro změnu PC na real-time regulátor, který nahrazuje běžné PLC. [23]



1.5.4 FANUC

Japonská firma FANUC produkuje lineární motory série Lis, které dosahují špičkové síly od 300 N až do 17000 N. Spolu s digitálními zesilovači série αi dosahují lineární motory rychlostí až 4 m/s. FANUC vyvíjí a vyrábí vlastní řídicí systémy CNC FANUC pro řízení různých aplikací. [22]



Obr. 16 Produkty FANUC [24]

1.6 Příklady aplikace lineárních motorů

1.6.1 Mazak Hyper Variaxis 630

Hyper Variaxis 630 je pětiosé obráběcí centrum od firmy Mazak. Stroj je určen pro výrobu s vysokou produktivitou, a pro obrobení polotovaru na jedno upnutí. Uspořádání os je typu gantry. Na obou rotačních osách (A, C) jsou přímé prstencové motory a na všech přímých osách (X, Y, Z) jsou lineární motory, které zajišťují vysokou dynamiku. Lineární motory pohybující se na válečkových vedeních umožňují rychlost až 80 m/min. [25, 26]



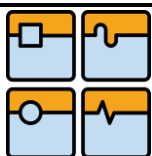
Obr. 17 Hyper Variaxis 630 [26]

1.6.2 Sodick VZ300L

Firma Sodick se již dlouhou dobu zabývá výrobou elektroerozivních strojů s lineárními motory. Jedním z představitelů je cenově dostupná drátová řezačka VZ300L. Stroj je určen pro přesné obrábění chirurgických nástrojů, součástí pro energetický průmysl a letecký průmysl. Lineární motory Sodick na osách (X, Y, Z, U, V) zajišťují přesný pohyb bez vibrací, možnost velmi jemného posuvu až v nanometrech, ale i rychloposuv. Kontrolér pohybu Sodick Motion Controller zajišťuje simultánní pohyb všech os a kontroluje jiskrovou mezeru v reálném čase. [8, 27]



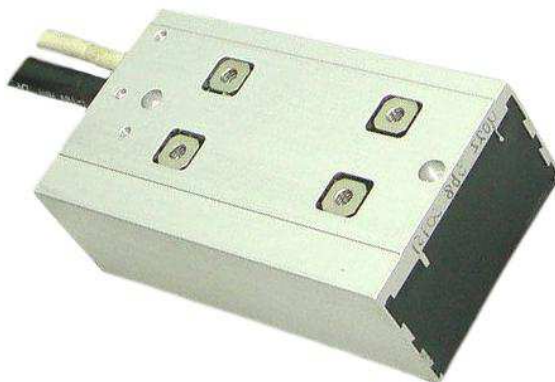
Obr. 18 VZ300L [8]



2 KONSTRUKCE LINEÁRNÍ OSY

2.1 Lineární motor

Jak již bylo uvedeno, jako pohon lineární osy bude použit lineární motor. A to typ AL2403–0001–0000 FLEX od firmy Beckhoff vyrobený v roce 2007. Jedná se o trojfázový synchronní servomotor s relativně malým výkonem. Tento lineární motor je vhodný zejména pro dynamické pohyby, kde jsou zapotřebí vysoká zrychlení na krátké vzdálenosti.



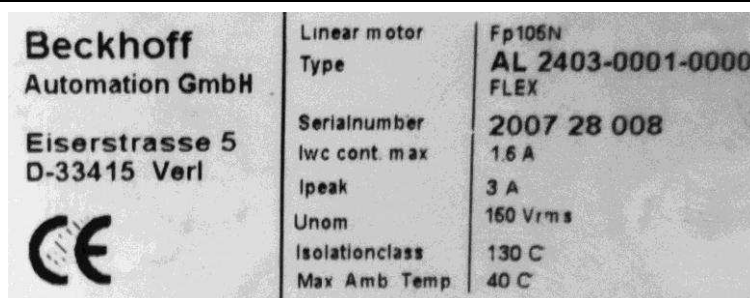
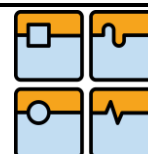
Obr. 19 AL2403–0001–0000 FLEX

Primární pohyblivý díl s cívkami obsahuje drážkované jádro s měděným vinutím. Tento typ obsahuje tři cívky, které jsou společně s drážkovaným jádrem zalité v hliníkovém pouzdře. Motor tak splňuje stupeň krytí IP 64, a je tedy vhodný pro použití v agresivním prostředí.

Přebytečné teplo, vznikající v cívkách motoru, odchází povrchem. Motor se tedy chladí vzduchem. Tepelná ochrana proti přehřátí motoru je zajištěna polovodičovým PTC–1k senzorem. PTC senzor vykazuje prudký nárůst odporu, když je teplota blízko určité kritické hodnoty, funguje tak jako digitální spínač. Pro sledování teploty je vhodný druhý snímač teploty KTY 21–6 se stabilním a mírným teplotním koeficientem.

Sekundární statický díl je tvořen ocelovou deskou, na které jsou pevně přidělány permanentní magnety. Pro lineární motory řady AL24xx jsou magnetické pláty řady AL25xx. Řada obsahuje tři různé délky magnetických plátů (96 mm, 144 mm a 384 mm), které mohou být za sebe skládány jakýmkoliv způsobem a vytvořit tak velké množství různých délek. Pro lineární osu jsou použity tři magnetické pláty AL2530-0000 s délkou 384 mm. [23, 28]

Protože jde o starší model motoru a výrobce už neposkytuje datasheet, takže technická data motoru jsou pouze ze štítku motoru a ostatní jsou odvozená podle podobného typu lineárního motoru.

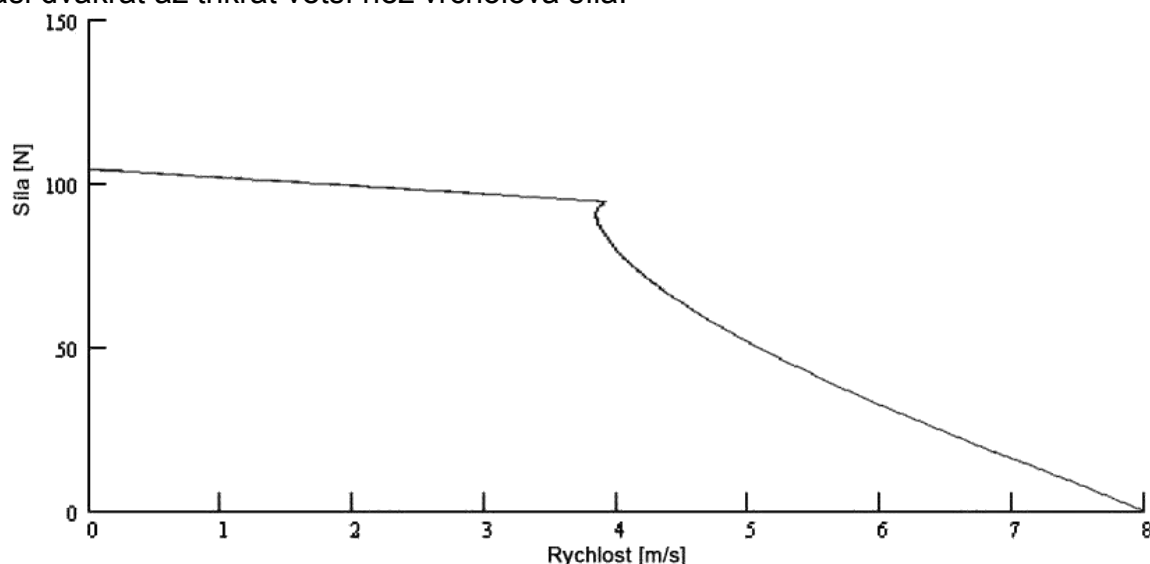


Obr. 20 Štítek motoru AL2403–0001–0000 FLEX

Tab. 3 Technická data lineárního motoru AL2403–0001–0000 FLEX [29]

Výška	31,25 mm
Šířka	51 mm
Délka	93 mm
Vrcholová síla	106 N
Vrcholový proud	3 A
Kontinuální síla	53 N
Kontinuální proud	1,6 A
Napájecí konstanta	34 N/A
Motorová konstanta	84 N ² /W
Magnetická přitažlivá síla	265 N
Váha primárního dílu	0,55 kg
Váha sekundárního dílu	2,1 kg/m

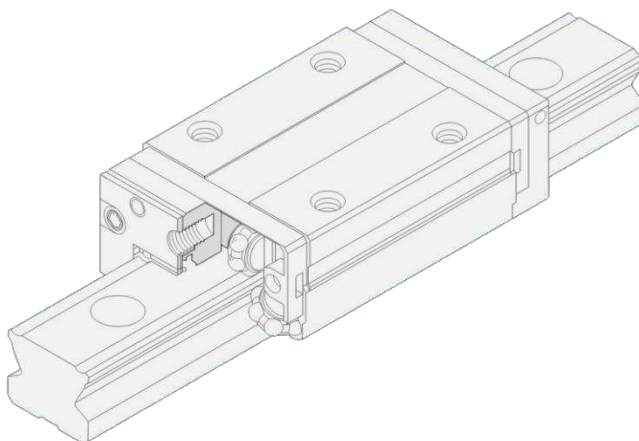
Vrcholová síla trvá pouze jen asi tři sekundy po rozjezdu motoru, poté je už jen zhruba poloviční, jak ukazuje mechanická charakteristika motoru. Podobně je na tom proud procházející cívkami. Magnetická přitažlivá síla, působící do vedení osy, je asi dvakrát až třikrát větší než vrcholová síla.



Obr. 21 Mechanická charakteristika motoru AL2403–0001–0000 FLEX [29]

2.2 Vedení


Jako vedení bude použito SSR 20XW od firmy THK. Je to profilové valivé vedení s oběhovými kuličkami zasazenými v klecích. Běžnější provedení bez klecí způsobuje to, že se o sebe oběhové kuličky třou, proto má vedení s kuličkami v klecích velké výhody. Produkce tepla při vyšších rychlostech je omezena v důsledku nepřítomnosti tření mezi sousedními kuličkami. Protože nejsou kuličky v kontaktu nevzniká při pohybu tolik hluku. Vedení se pohybuje plynule, protože kuličky jsou rozmístěny rovnoměrně. Vedení má tak delší životnost a dlouhodobý bezúdržbový provoz. Kuličky obíhají ve čtyřech oběžných drahách, kde dvě jsou v úhlu 90°. Díky tomu typ SSR může nést zatížení v radiálním i v bočním směru. [30, 31]

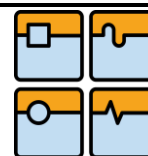


Obr. 22 Struktura vedení SSR [30]

Na lineární osu budou použity dvě kolejnice o délce 1240 mm. Každá kolejnice bude s jedním vozíkem.

Tab. 4 Technická data vedení SSR 20XW[30]

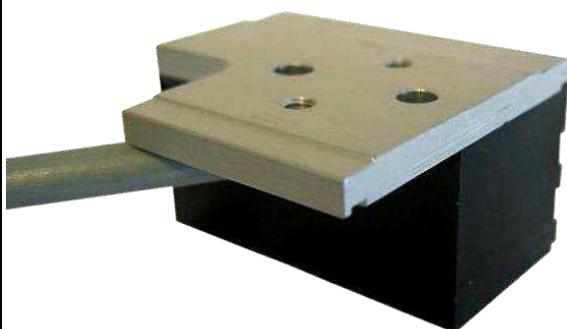
Celková výška (vozík + kolejnice)	28 mm
Výška vozíku	22 mm
Šířka vozíku	42 mm
Délka vozíku	82 mm
Hmotnost vozíku	0,25 kg
Výška kolejnice	15,5 mm
Šířka kolejnice	20 mm
Délka kolejnice	1240 mm
Hmotnost kolejnice	3,35 kg
Základní únosnost statická	19,6 kN
Základní únosnost dynamická	23,4 kN
Povolený statický moment (dvojice vozíků) 	0,723 kN·m
Povolený statický moment (dvojice vozíků) 	0,448 kN·m



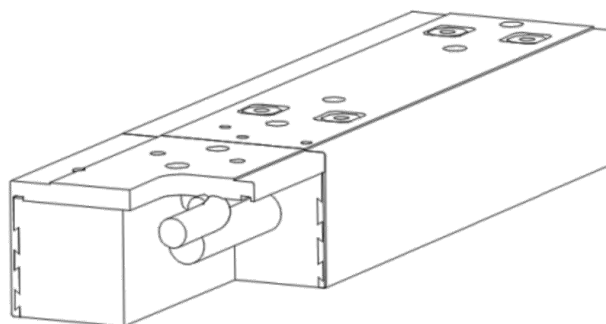
2.3 Odměřovací systém

Pro zajištění zpětné vazby se nabízejí dvě možnosti. Magnetický odměřovací systém, který využívá k polohování přímo magnetické pláty motoru. Je to levná a jednoduchá varianta, ale s menší přesností. Proto je možnost použít i druhý optický odměřovací systém, který je přesnější.

Magnetický odměřovací systém (Magnetic Encoder System - zkráceně MES) typ AL2200–0000 od Beckhoffu je nabízený jako volitelná výbava k lineárnímu motoru. Reprezentuje levný odměřovací systém, který nepotřebuje žádné přídavné odměřovací pravitko, využívá totiž sekundárního dílu motoru, čili magnetických plátů nad kterými se motor pohybuje. Čtecí hlava má integrované analogové hallové sondy, které analyzují magnetické pole magnetických plátů a poskytují analogový výstupní signál. Stejně jako motor, je čtecí hlava odměřovacího systému umístěna na nosné části a pohybuje se spolu s motorem. Vzdálenost čtecí hlavy od motoru nehraje roli. Nevýhodou tohoto systému je malá přesnost, která je pouze jen 0,1 mm, což by pro mnoho aplikací nemuselo být dostačující. [28, 32]



Obr. 23 Čtecí hlava MES [28]



Obr. 24 Lineární motor a MES [28]

Tab. 5 Technická data magnetického odměřovacího systému [32]

Výška	30 mm
Šířka	50 mm
Délka	55 mm
Rozteč stupnice	24 mm
Rozlišení	5–10 μm
Přesnost	100 μm
Opakovatelnost	50 μm
Napájecí napětí	5 V
Stupeň krytí	IP 64

Druhou možností je systém lineární polohové zpětné vazby RGH24 od Renishaw. RGH24 je optický, inkrementální, odměřovací systém, který doplňuje rychlost a polohovací výkon lineárního motoru. Je bezkontaktní takže nedochází ke tření a opotřebení. Filtrační optika zajišťuje dobrou stabilitu signálu i v horších podmínkách, a je spolehlivá i při vysokorychlostních operacích. Odměřovací systém se skládá z čtecí hlavy RGH24D a ze stupnice RGS20-S.

RGH24D je čtecí hlava s robustním pláštěm, nízkou hmotností a je velmi kompaktní. Pro dosažení optimálního nastavení je čtecí hlava vybavena systémem integrované nastavovací LED diody, která se při správném ustavení zeleně rozsvítí.

Čtecí hlava se pohybuje nad stupnicí RGS20-S. Stupnice je reflexní pozlacený ocelový pásek s ochrannou vrstvou laku. Speciální samolepicí vrstva na spodní části pásu eliminuje nutnost vrtání a řezání závitu.

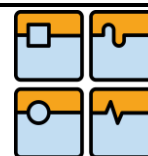
Světlo vyzářené z infračervené LED diody se odráží od šikmých faset stupnice zpět do čtecí hlavy. V optickém systému se pak vyhodnotí průměrná hodnota odražených signálů od faset. Stabilita signálu je zajištěna efektivním filtrováním signálů, které neodpovídají stupnici, což je potřeba hlavně v případě, když je stupnice lehce poškozena nebo znečištěna. [33, 34]



Obr. 25 Optický odměřovací systém RGH24 [33]

Tab. 6 Technická data RGH24D a RGS20-S [33, 34]

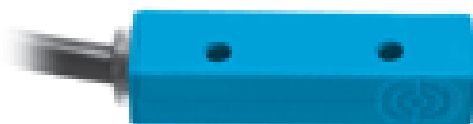
Výška čtecí hlavy	14,8 mm
Šířka čtecí hlavy	13,5 mm
Délka čtecí hlavy	36 mm
Váha čtecí hlavy	11 g
Výška pravítka	0,2 mm
Šířka pravítka	6 mm
Délka pravítka	1180 mm
Maximální rychlost	8 m/s
Rozteč stupnice	20 μ m
Rozlišení	5 μ m
Linearita	$\pm 3 \mu\text{m/m}$ $\pm 0,75 \mu\text{m/60 mm}$
Napájecí napětí	5 V
Stupeň krytí	IP 40



Pro správné fungování lineární osy jsou potřeba koncové snímače, které označují softwarový konec osy. Na každém konci lineární osy bude použit jeden indukční snímač IH020BK41VB od firmy Wenglor.

Tyto senzory nemají žádné pohyblivé části, proto jsou bezúdržbové a mohou být instalovány v jakékoliv poloze. Senzor je v plastovém pouzdře, takže je vodotěsný a odolný proti znečištění a nárazům. Senzor má také ochranu proti zkratu, přepólování a přetížení.

Pod aktivní částí povrchu indukčního snímače je umístěn rezonanční obvod. Když se přiblíží kovový materiál, tak elektromagnetické pole generované rezonančním obvodem bude ovlivněno, a jakmile se přiblíží na spínací vzdálenost, tak senzor sepne. [35, 36]



Obr. 26 Indukční snímač IH020BK41VB [35]

Tab. 7 Technická data indukčního snímače IH020BK41VB [35]

Výška	8 mm
Šířka	8 mm
Délka	41 mm
Spínací vzdálenost	2 mm
Hystereze spínání	<15%
Frekvence spínání	1500 Hz
Korekční faktory Nerez ocel/Mosaz/Hliník	0,73/0,49/0,39
Napájecí napětí	10 – 30 V
Spotřeba proudu	<6 mA
Teplotní rozsah	-25 – 80 °C
Spínací proud	100 mA
Stupeň krytí	IP 67

2.4 Konstrukční uspořádání

2.4.1 Původní stav lineární osy

Při konstrukci samotné lineární osy se vycházelo z již stávající nefunkční konstrukce osy, jak ukazuje obr. 27. Původní konstrukce zahrnovala základ, což je 20 mm silný kovový plát. Základ je šrouby uchycen v drážkách profilu z hliníkové slitiny. Na základu je přišroubováno vedení a mezi vedení jsou přišroubovány magnetické pláty motoru, ještě s ochranou fólií. Vozíky vedení a lineární motor spojuje nosná část. Kabeláž od motoru je buď bez konektorů nebo se špatnými konektory.

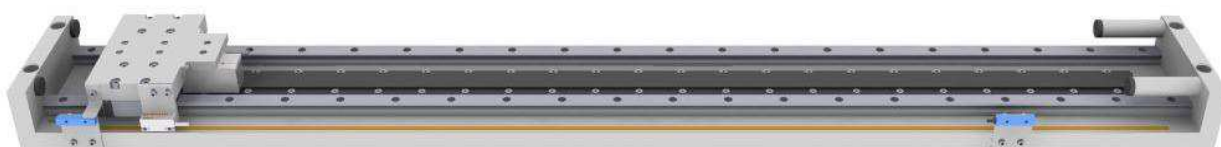


Obr. 27 Původní konstrukce lineární osy

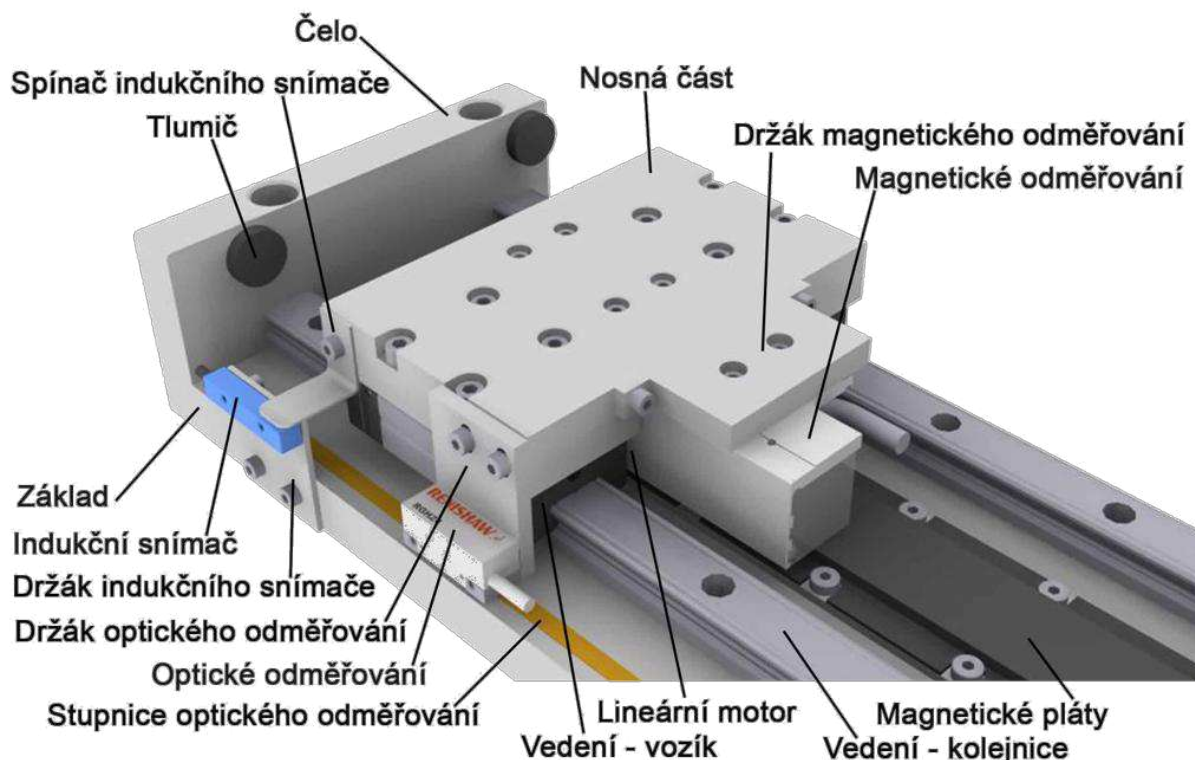
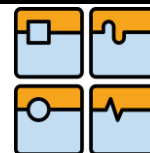
2.4.2 Model lineární osy

Jako první byl při návrhu konstrukce lineární osy vytvořen model. Model byl realizován v programu Autodesk Inventor Professional 2009. Aby byla osa v provozuschopném stavu, bylo zapotřebí konstrukci doplnit o několik prvků, či některé prvky předělat. Konkrétně předělat nosnou část spojující vedení a lineární motor. Dále k nosné části vyrobit jak držák magnetického odměřovacího systému, tak i držák optického odměřovacího systému. Na osu bylo také potřeba doplnit čela a k nim i tlumiče. Nakonec vyrobit držáky pro indukční snímače.

Při návrhu se vycházelo z již stávající konstrukce a z požadavků na konstrukci vyplývajících z parametrů motoru a ostatních komponent.



Obr. 28 Model lineární osy



Obr. 29 Model lineární osy – popis

2.4.3 Nosná pohyblivá část

Nosná část primárně slouží ke spojení vozíků vedení a lineárního motoru. Udrží motor ve správné výšce nad magnetickými pláty a přenáší zatížení na vedení. Případně po úpravě by nosná část mohla sloužit také jako prvek pro upevnění zařízení, s kterými by měla lineární osa pohybovat. Dále jsou k nosné části přišroubovány jak držák magnetického odměřování, tak i držák optického odměřování a spínač indukčního snímače.

Konstrukce nosné části vychází z původního konceptu, který je vidět na obr. 27. Původní součást měla rozměry výška x šířka x délka – 36 x 144 x 100 mm a váhu asi 3,1 kg. Byla příliš předimenzovaná a zbytečně by tak zatěžovala motor. Nová součást vznikla odfrézováním vrchní plochy o 9 mm, stále však zůstala dost vysoká, aby hlavy všech šroubů od motoru a vedení byly dostatečně zapuštěny. Spodní plochy, které jsou v kontaktu s vozíky vedení byly také odfrézovány o 6 mm, z toho důvodu aby byl lineární motor ve vzdálenosti 0,5 mm od magnetických plátů, jak doporučuje výrobce. Nové rozměry součásti jsou 21 x 144 x 100 mm a váha 1,6 kg, což je zhruba poloviční než původní. Nosná část je k vozíkům vedení přišroubována celkem 8 šrouby ISO 4762 M5x20. Motor je k nosné části také přišroubován a to 4 šrouby ISO 4762 M4x10.

Držák magnetického odměřování je k nosné části přišroubován dvěma šrouby ISO 4762 M4x10. Jeho rozměry jsou 9 x 80 x 35 mm. Rozměry jsou voleny, tak že je magnetické odměřování ve stejné výšce jako motor a správně k němu i přiléhá, jako ukazuje obr. 24.

Držák optického odměřování je konstruován tak, aby zajistil správnou funkci čtecí hlavy. Čtecí hlava optického odměřovacího systému je přišroubována k držáku

dvěma šrouby M3. Držák má celkové rozměry 47 x 5 x 36 mm a je k nosné části také přišroubován a to dvěma šrouby ISO 4762 M4x10. Místo děr pro šrouby jsou v držáku dvě oválné drážky, které zajišťují možnost správného ustavení čtecí hlavy nad stupnicí.

K nosné části je ještě také přišroubován ohnutý plíšek, který slouží jako spínač koncových indukčních snímačů.



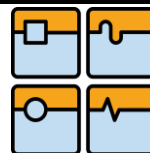
Obr. 30 Nosná část

2.4.4 Základ osy

Základ lineární osy slouží k nesení celé váhy osy a jsou k němu přišroubovány nepohyblivé prvky osy. Tvoří ho 20 mm silný kovový plát o rozměrech 160 x 1280 mm. Délka 1280 mm je zároveň i celkovou délkou osy. Základ je šrouby upevněn k profilu z hliníkové slitiny, který je svorkami přidělán k desce stolu.

Kolejnice vedení jsou přišroubovány celkem 42 šrouby M5x8 s roztečí 60 mm. Mezi kolejnicemi jsou k základu přišroubovány tři k sobě přiléhající magnetické pláty, na které je celkově použito 48 šroubů M5x10. Po jedné straně základu bude nalepena stupnice optického odměřování.

Držáky indukčních koncových snímačů jsou přišroubovány každý dvěma šrouby M4x10 ve vzdálenosti jeden 50 mm a druhý 170 mm od konců osy, aby došlo k bezpečnému zastavení motoru ještě před dosažením nárazu do tlumičů. Samotné indukční snímače jsou pak přišroubovány k držáku každý dvěma šrouby M3.



Obr. 31 Lineární osa

2.4.5 Čela osy

Čela lineární osy zakončují celou konstrukci. Jejich účelem je zabránit motoru a dalším pohyblivým prvkům, aby opustili vymezený prostor na ose. Jejich rozměry jsou 50 x 160 x 20 mm a k základu jsou přišroubovány stejnými šrouby, kterými je přidělán základ k hliníkovému profilu.

Na čelech jsou umístěny tlumiče, aby v případě nezastavení motoru zmírnili velikost nárazu a nedošlo k poškození jednotlivých prvků. Jsou situovány tak aby při nárazu došlo ke kontaktu s nosnou částí motoru. Tlumiče jsou nalepené gumové válečky o průměru 25 mm a výšce 5 mm. Na straně, kde by nejdříve narazilo do čela magnetické odměřování, jsou tlumiče prodlouženy kovovými válečky, aby opět došlo ke kontaktu pouze s nosnou částí.



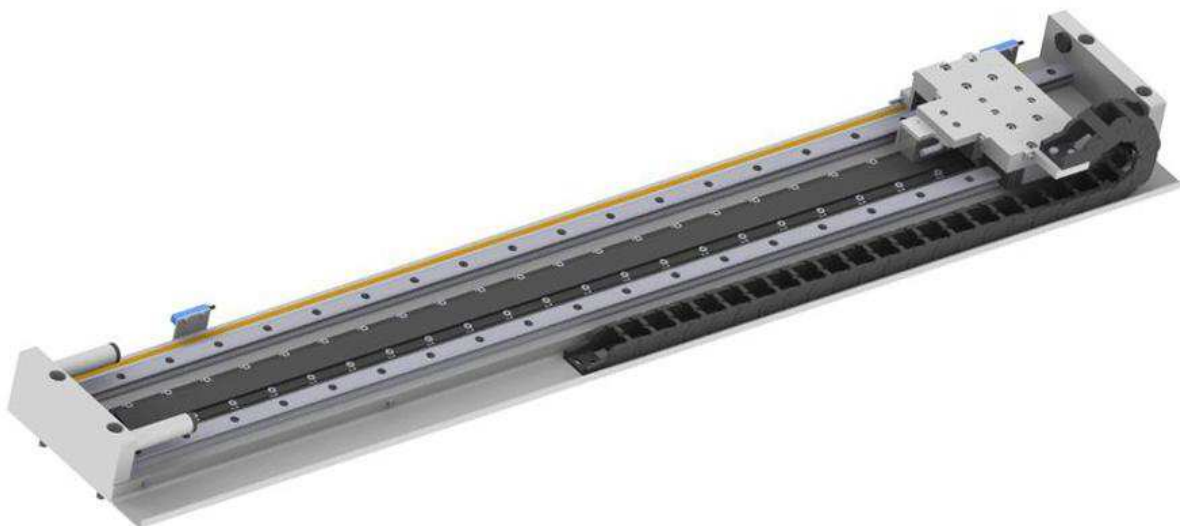
Obr. 32 Čelo lineární osy

2.4.6 Energetický řetěz

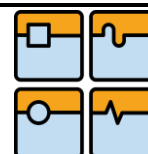
Pro správnou funkci lineární osy by měla být vybavena pohyblivým vedením kabelů, neboli energetickým řetězem. Ten chrání kabely před poškozením a zajišťuje aby nedošlo ke kontaktu pohyblivých částí osy s kabely. Většinou jsou vyrobeny z plastu, a mohou být i zcela uzavřené, kvůli ochraně proti řezné kapalině či odletujícím třískám.

Energetické řetězy však nejsou nezbytně nutné pro chod lineární osy. Pro naše testovací a výukové účely bylo proto určeno, že se doplní později. Je však nutnost dát pozor aby při pohybu osy nedošlo ke kontaktu s kabely.

Energetický řetěz potřebuje vedení, aby se pohyboval po předem určené dráze. V tomto případě by se pohyboval ve žlabu z ohnutého plechu o tloušťce 2 mm a rozměrech asi 20 x 50 x 1280 mm. Žlab by byl k základu nejspíše přišroubován. Energetický řetěz by byl k nosné pohyblivé části přišroubován pomocí dalšího držáku. Jelikož se ale prozatím nebude pohyblivé vedení kabelů realizováno, zůstává tak energetický řetěz a komponenty k němu určené prozatím ve fázi návrhu modelu.

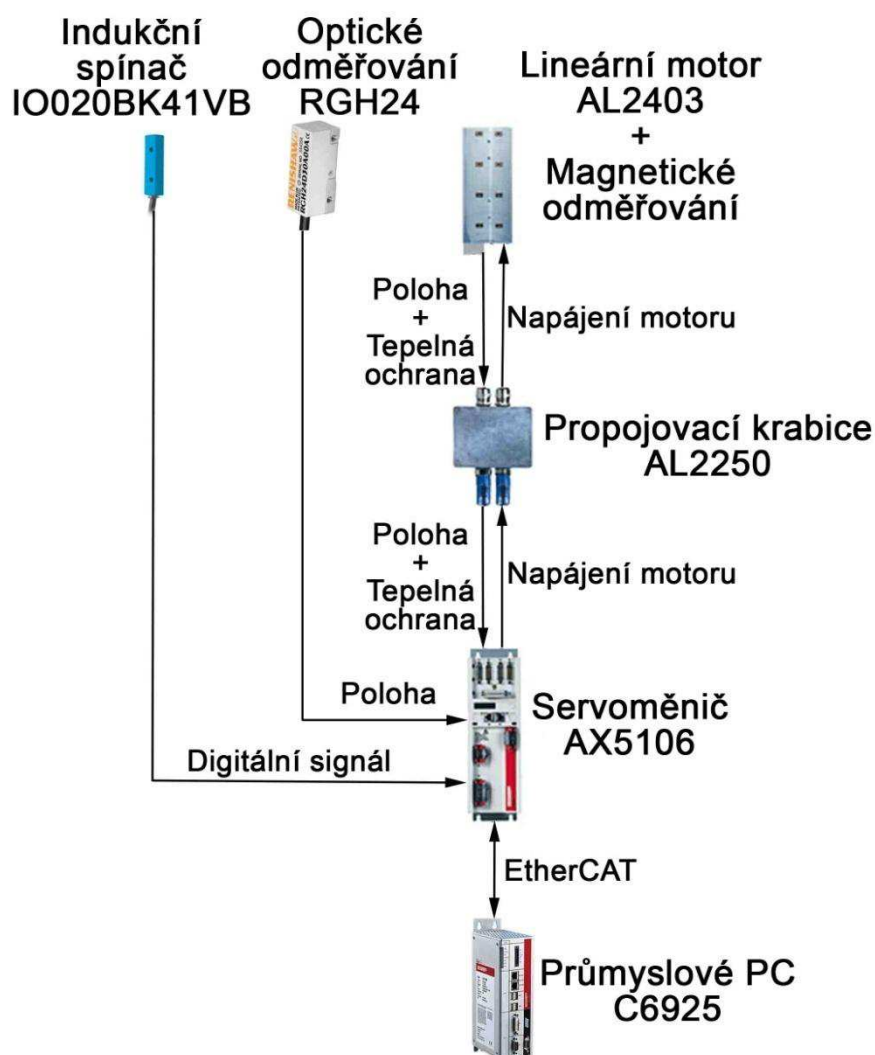


Obr. 33 Model lineární osy s energetickým řetězem



3 ELEKTRICKÉ ZAPOJENÍ LINEÁRNÍ OSY

Pro správný pohyb osy a možnost jejího řízení, musí být nejen správně zkonstruována, ale samozřejmě i správně elektricky zapojena. Elektrické zapojení musí zajišťovat napájení lineárního motoru, odměřování polohy, tepelnou ochranu motoru a zapojení koncových spínačů. Elektrické zapojení je realizováno podle schématu na obr.34.



Obr. 34 Schéma elektrického zapojení

3.1 Průmyslové PC C6925

Celý systém bude řízen průmyslovým PC C6925–0000 od Beckhoffu, který je určen pro montáž do rozvaděče. Kompaktní hliníkový kryt tohoto průmyslového PC je vybaven 3,5 palcovou základní deskou s procesorem Intel Celeron M 1.0 GHz a operační pamětí 256 MB DDR-RAM. Harddisk počítače má kapacitu 40 GB a je na něm nainstalován operační systém Windows XP Embedded. Tato řada počítačů je dodávána s 24 V DC napájecím zdrojem. Chlazení je realizováno na pravé straně krytu chladicími žebry, ty umožňují provoz bez ventilátoru až do teploty 55 °C.

Počítač je vybaven dvěma nezávislými Ethernet rozhraními, dále čtyřmi USB konektory, DVI-I a RS 232 rozhraními. Všechny konektory jsou pro lepší přístupnost umístěny na přední straně krytu. [37]

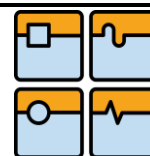


Obr. 35 Průmyslové PC C6925 [23]

3.2 Servořízení

3.2.1 Princip servořízení

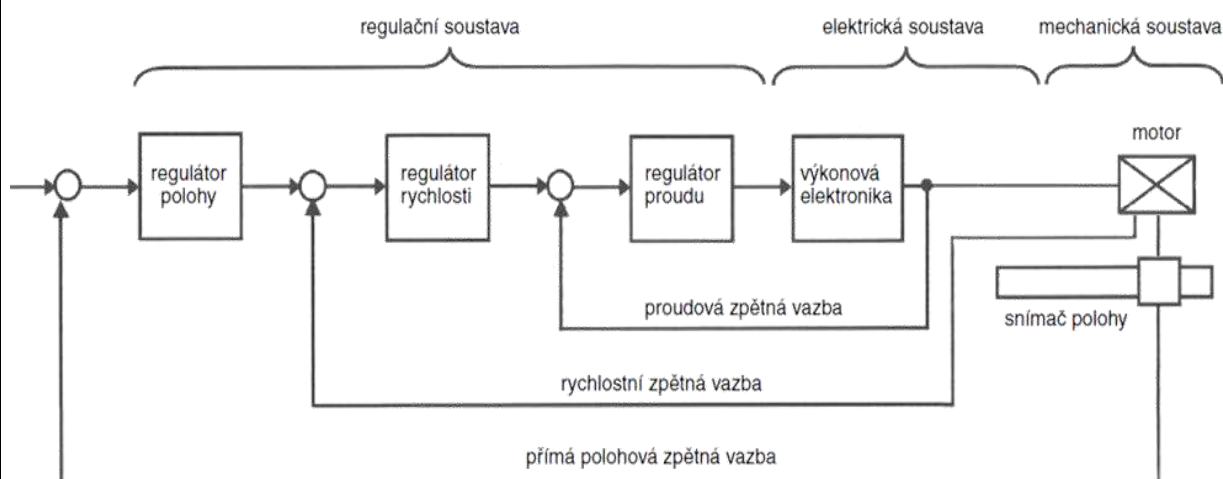
Elektrický servomechanismus se skládá z motoru, výkonové elektroniky, regulátoru pro řízení polohy, a snímače polohy. Pro řízení os se využívá takzvaná vlečná (sledovací) regulace, kdy regulovaná veličina sleduje zadanou řídicí veličinu s časovým zpožděním. Servoměnič vytváří regulační smyčku, která se stává ze tří kaskádově uspořádaných zpětných vazeb, nejpodřízenější proudové vazby s PI regulátorem, nadřízenější rychlostní vazby také s PI regulátorem a nejnadřízenější polohové vazby s P regulátorem.



Nejprve je řídicím systémem zadána vstupní hodnota polohy, případně i rychlosti a zrychlení. Skutečnou hodnotu polohy pak udává snímač polohy. Tyto hodnoty jdou do regulátoru polohy, kde je srovnána požadovaná hodnota se skutečnou. Regulátor polohy průběžně vypočítává regulační odchylku polohy a předává dál signál o požadované rychlosti. Požadovaná rychlost je dána součinem regulační odchylky polohy a rychlostním zesílením. Rychlostní zesílení udává strmost charakteristiky zesilovače signálu, jinak řečeno, čím vyšší hodnota rychlostního zesílení je nastavena, tím rychleji motor reaguje, musí se však brát ohled na pohybové vlastnosti mechanické soustavy.

Signál požadované rychlosti vstupuje do regulátoru rychlosti, kde je porovnán s hodnotou s rychlostní zpětné vazby a je aplikováno rychlostní omezení. Výstupem s rychlostního regulátoru je hodnota požadovaného proudu, který vzniká převedením z rychlostní regulační odchylky.

Hodnota požadovaného proudu je vstupem do nejpodřízenější proudové regulační smyčky, kde je porovnávána se skutečným proudem v motoru. Vzniká tak proudová regulační odchylka, která je proudovým regulátorem převedena na požadované napětí na motoru. Rychlostní a proudová regulační smyčka není nezbytně nutná, zkvalitňuje však kvalitu regulace. [38]



Obr. 36 Blokové schéma vlečné regulace [38]

3.2.2 EtherCAT

Průmyslové PC komunikuje se servoměničem pomocí rozhraní EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) vynalezené firmou Beckhoff. EtherCAT je sběrnice systému na bázi Ethernetu vyvinutá pro rychlý přenos dat s krátkým komunikačním cyklem v reálném čase, což ji předurčuje pro použití při řízení pohonů. EtherCAT má flexibilní topologii, a nepotřebuje žádný speciální hardware. Pro připojení jednotlivých periférií se využívá standardní konektor Ethernet, a stejně tak se využívají i standardní ethernetové kabely. [39]

3.2.3 Servoměnič AX5106

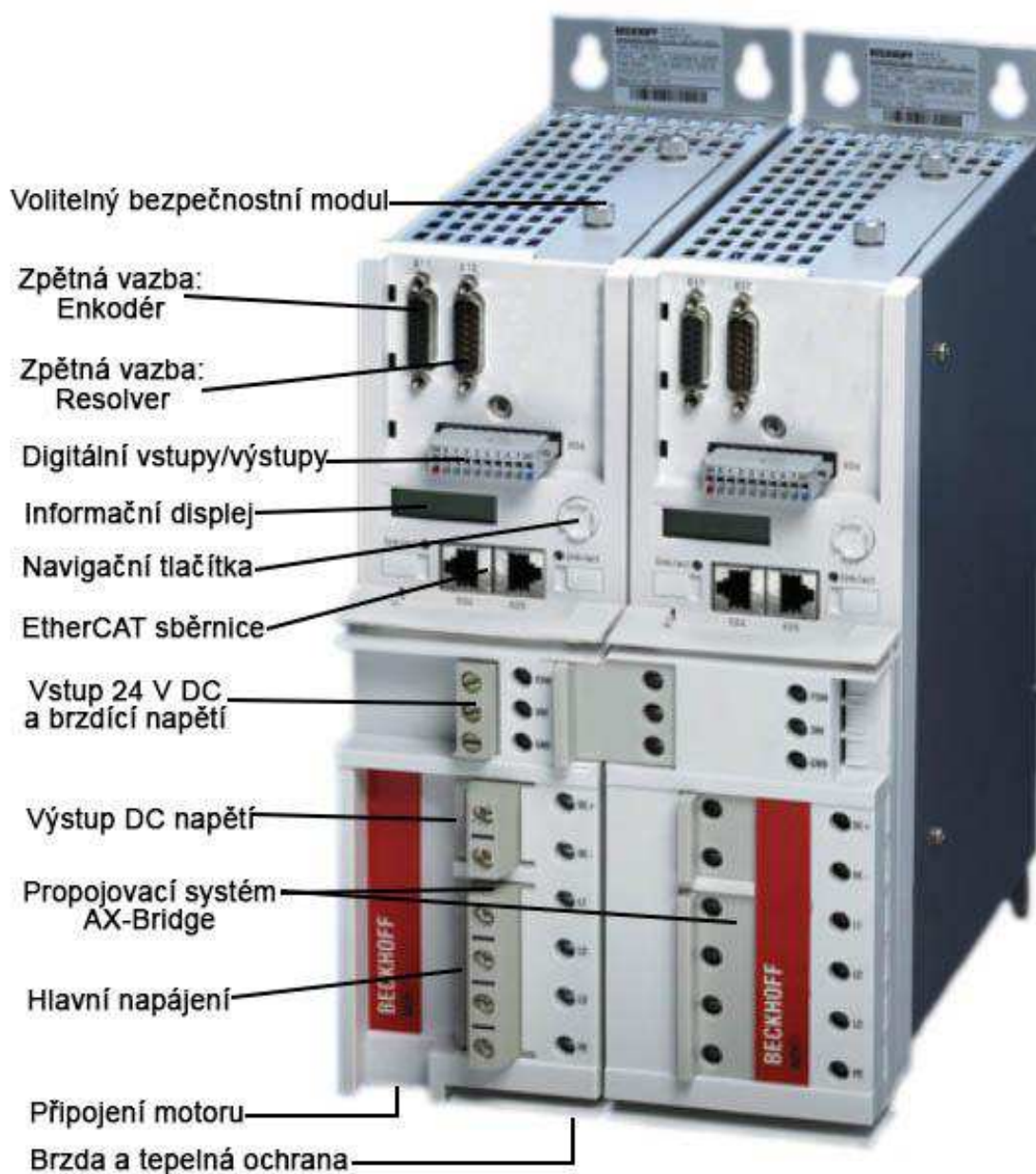
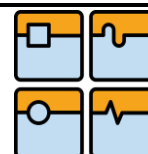
Pro řízení motoru bude využit servoměnič AX5106–0000 od firmy Beckhoff. Je jednokanálový s integrovanou technologií řízení, která podporuje rychlé a vysoce dynamické polohovací úlohy. Řada AX5000 byla vyvinuta speciálně pro použití s vysoce výkonným komunikačním systémem EtherCAT. K servoměniči AX5106 lze připojit širokou škálu motorů, k tomuto bude připojen lineární motor.

Jednoduchým a rychlým propojením několika servoměničů řady AX5000, propojovacím systémem AX-Bridge, umožňuje vytvoření systému multi-osy. Na jeden servoměnič se jednoduše nasadí napájecí modul a na další servoměniče propojovací moduly, jak je vidět na obr. 37. Moduly spojují hlavní napájení, výstup DC napětí a brzdné napětí. Použitý servoměnič AX5106 je tímto systémem propojen s dalším servoměničem AX5106. Pro naše účely však stačí jeden servoměnič, protože potřebujeme řídit jen jednu osu.

Servoměnič také obsahuje digitální vstupy a výstupy, konkrétně 6 pinů pro digitální výstupy a jeden který lze použít jako vstup nebo i jako výstup. Na dalším pinu je napětí 24 V a na posledním 0 V. [23, 40]

Tab. 8 Technická data servoměniče AX5106 [23]

Výška	274 mm
Šířka	92 mm
Délka	232 mm
Váha	5 kg
Jmenovitý proud jedna fáze	4,5 A
Jmenovitý proud tři fáze	6 A
Výstupní frekvence	0-1000 Hz
Výstup stejnosměrného napětí	max. 890 V DC
Jmenovité napájecí napětí jedna fáze	100-240 V AC
Jmenovité napájecí napětí tři fáze	100-480 V AC
Jmenovitý napájecí proud jedna fáze	8,6 A
Jmenovitý napájecí proud tři fáze	6,6 A
Vstupní frekvence	50/60 Hz
Maximální okolní teplota	50 °C
Konstantní brzdový výkon	150 W
Maximální brzdový výkon	14 kW



Obr. 37 Popis servoměniče AX5106 [23]

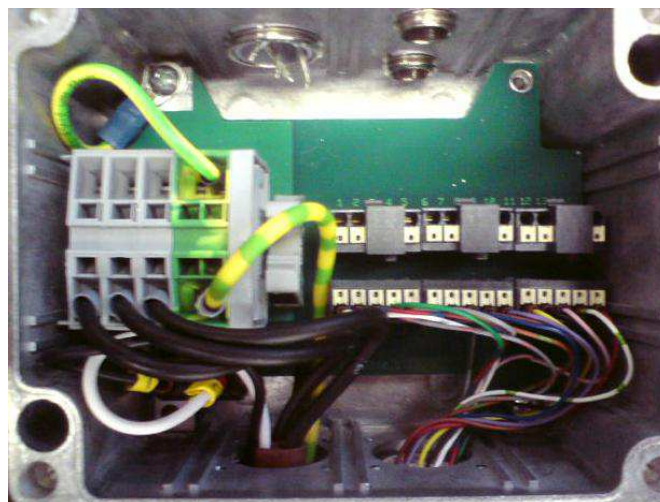
Zpětnou vazbu jde na servoměniči realizovat různými způsoby. Například revolver, TTL encoder, sinus/cosinus 1Vpp, EnDAT, BiSS, Hiperface. Použité odměřovací systémy mají různé výstupní signály, čili i rozdílné zapojení pinů do servoměniče. Magnetický odměřovací systém má analogový výstupní signál sin/cos 1 Vpp. Optický odměřovací systém má digitální výstupní signál TTL, neboli čtvercové vlny. [23]

Tab. 9 Zapojení odměřovacího systému do servoměniče [40]

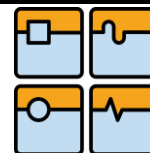
Pin	Sinus/Cosinus 1 Vpp	TTL
1	SIN +	Nezapojený
2	GND 5 V	GND 5 V
3	COS +	Nezapojený
4	5 V	5 V
5	Nezapojený	Signál B +
6	Nezapojený	Nezapojený
7	Reference Z -	Reference Z -
8	Nezapojený	Signál A +
9	SIN -	Nezapojený
10	GND Sense	GND Sense
11	COS -	Nezapojený
12	5 V Sense	5 V Sense
13	Nezapojený	Signál B -
14	Reference Z +	Reference Z +
15	Nezapojený	Signál A -

3.3 Propojovací krabice a kabeláž

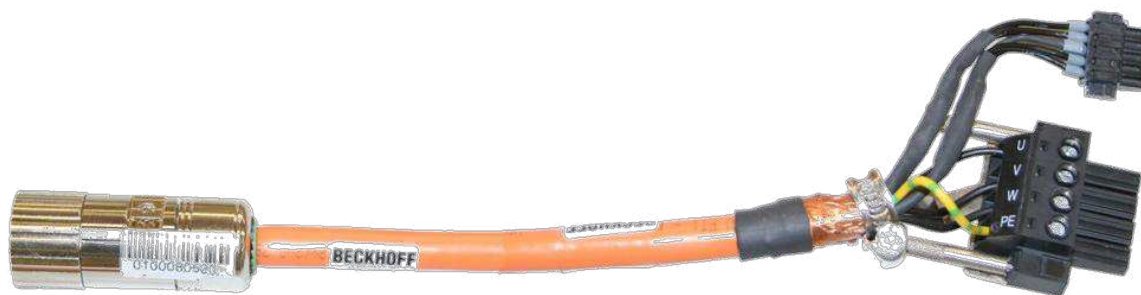
Propojovací krabice AL2250–0000 zjednodušuje kabeláž mezi lineárním motorem a servoměničem. Kabel napájení motoru, kabel tepelné ochrany motoru a kabel od odměřovacího systému jsou zavedeny do propojovací krabice skrz kabelové vývody, a připojeny na svorkovnici. Kontakty tepelné ochrany jsou spojeny s kabelem napájení motoru, takže už není potřeba samostatný kabel tepelné ochrany. Na druhé straně propojovací krabice jsou připojeny standardní kabely napájení motoru a odměřovacího systému. [23]



Obr. 38 Propojovací krabice AL2250



ZK4500-0023 je jeden z kabelů propojujících servoměnič a propojovací krabici. Kabel má dva konektory pro připojení k servoměniči. Konektor pro připojení napájení motoru obsahuje vývody na jednotlivé fáze U, V, W a vývod na uzemnění a stínění PE. Dále konektor pro tepelnou ochranu T- a T+, brzdu B- a B+ a uzemnění PE. [23]



Obr. 39 Kabel motoru ZK4500-0023 [23]

Druhým kabelem připojeným k servoměniči je ZK4510-0020. Je to kabel pro připojení magnetického odměřovacího systému (MES). Piny tohoto kabelu jsou zapojeny podle tab.7. [23]

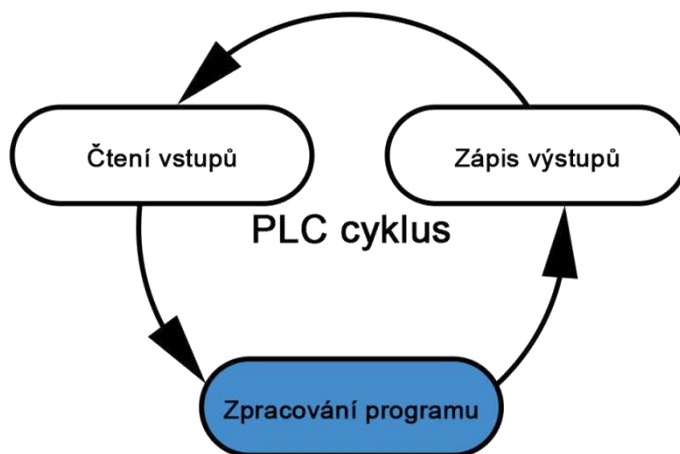


Obr. 40 Kabel odměřovacího systému ZK4510-0020 [23]

4 ŘÍDÍCÍ SYSTÉM

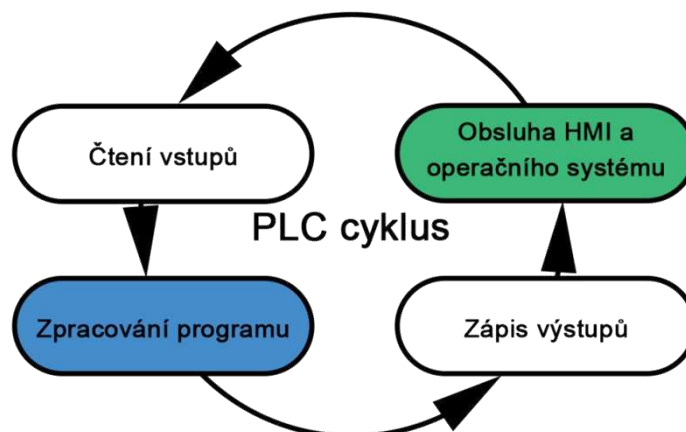
4.1 Klasické a softwarové PLC

Klasické PLC je malý průmyslový počítač používaný pro řešení úloh v reálném čase s co nejkratší dobou odezvy. PLC vykonává program v cyklech, to znamená že si přečte všechny vstupy, poté podle programu spočítá všechny podmínky, které určují, jak budou vypadat výstupy, ty pak najednou zapíše na výstupy. Posléze vyřeší všechny požadavky na komunikaci a opět čte vstupy. To vše udělá velice rychle, cyklus trvá řádově milisekundy. Uživatelské rozhraní (HMI) a operační systém, které s PLC mohou komunikovat přitom běží na jiném hardwaru než PLC.

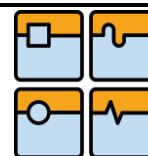


Obr. 41 Cyklus na klasickém PLC

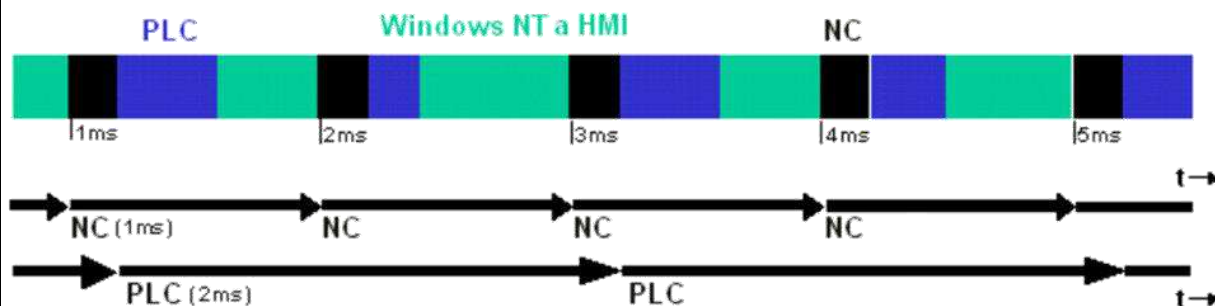
Oproti tomu softwarové PLC běží na stejném hardwaru jako HMI a operační systém. V softwarovém PLC programy běží přesně stejným způsobem, jako v klasickém PLC. To znamená v přesně načasovaných cyklech, ale s tím rozdílem, že dochází k dělbě výpočetního času mezi softwarové PLC a HMI. Hardware tak musí mít dostatečný výkon, aby dokázal v rámci jednoho cyklu obsloužit jak PLC program, tak i HMI a operační systém. Ovšem v dnešní době výkonných počítačů, takový problém není.



Obr. 42 Cyklus na softwarovém PLC



Při kombinaci PLC a NC se v klasickém případě jednalo o dva hardwary, které byly propojeny vodiči. V případě softwarového PLC a NC společně s operačním systémem a HMI, které běží na stejném hardwaru, jsou úlohy prováděny současně v překrývajících se cyklech. Mluvíme tak o tzv. multitaskingu. Každá úloha pracuje s vlastním časem cyklu a prioritou. Příklad je na obr. 43, cyklus NC musí proběhnout jednou za milisekundu a PLC jednou za dvě milisekundy, ve zbývajícím čase je obsluhován HMI a operační systém. [23]



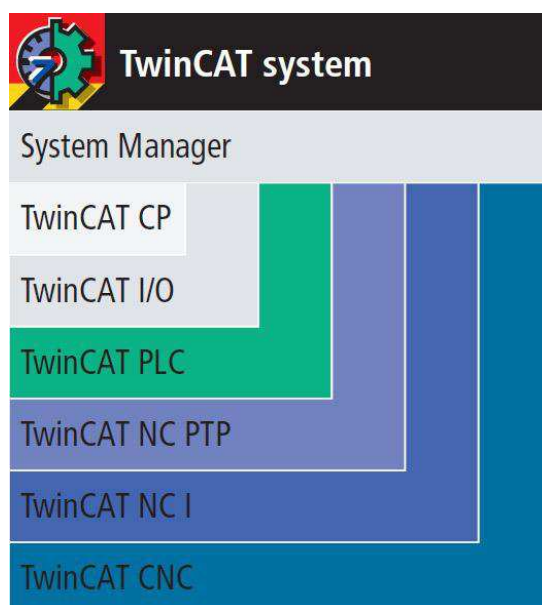
Obr. 43 PLC a NC cyklus [23]

4.2 TwinCAT

Softwarový systém TwinCAT (Total Windows Control and Automation Technology) od firmy Beckhoff dokáže změnit téměř libovolný kompatibilní PC na real-time regulátor se systémem multi-PLC a NC řízení os. TwinCAT tak nahrazuje běžné PLC a NC řízení.

Architektura TwinCATu je složená ze serverů (run-time systémů), které provádějí řídicí programy v reálném čase, a z vývojového prostředí pro programování, konfiguraci a diagnostiku.

Z real-time rozšířením pro Windows NT má TwinCAT přesnou časovou základnu, ve které jsou programy prováděny s nejvyšší prioritou, nezávisle na dalších úlohách procesoru. Vytížení procesoru lze v TwinCATu nastavit. [23]



Obr. 44 Moduly TwinCATu [23]

4.2.1 Moduly TwinCAT

TwinCAT CP

TwinCAT CP je ovladač pro průmyslové ovládací a zobrazovací zařízení od Beckhoffu. Ovládací a zobrazovací prvky vytvářejí nezávislé jednotky a s počítačem jsou spojeny kabelem. TwinCAT CP vytváří spojení mezi hlavními Windows programy a ovládacími, či zobrazovacími zařízeními.

TwinCAT I/O

TwinCAT I/O je real-time ovladač pro Windows programy. Mapuje a generuje adresy vstupních a výstupních zařízení. Nastavuje proměnné vstupních a výstupních zařízení v systému, a uvádí je do správného vztahu mezi sebou. TwinCAT I/O podporuje všechny zavedené komunikační sběrnice, dokonce i současně.

TwinCAT PLC

Vytváří v PC čistě softwarové PLC. TwinCAT PLC umožňuje vytvořit až čtyři virtuální PLC na jednom PC. TwinCAT PLC běží pod Windows a zahrnuje programovací prostředí i run-time systém, takže není potřeba další programové vybavení. PLC program může být napsán v jednom nebo více jazycích (IL, LD, FBD, SFC, ST). Modifikace programů jsou realizovány pomocí sítě, která je schopná účinně komunikovat s run-time systémem.

TwinCAT NC PTP

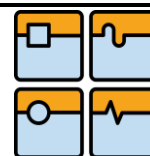
Řízení polohy pomocí PC. TwinCAT NC PTP obsahuje software pro polohování osy, integrovaný PLC software s NC rozhraním, program pro uvedení do provozu a připojení I/O k osám prostřednictvím různých sběrnic. TwinCAT NC PTP nahrazuje konvenční polohovací moduly a NC řadiče. Výkon PC umožňuje pohyb osy paralelně s funkcí PLC.

TwinCAT NC I

TwinCAT NC Interpolation je NC systém pro interpolaci. Obsahuje interpolaci ve třech dimenzích, integrovaný PLC software s NC rozhraním a připojení I/O k osám. Umožňuje řízení osy pod Windows. Hardwarové moduly jsou tím zbytečné, protože jsou simulovány softwarově.

TwinCAT CNC

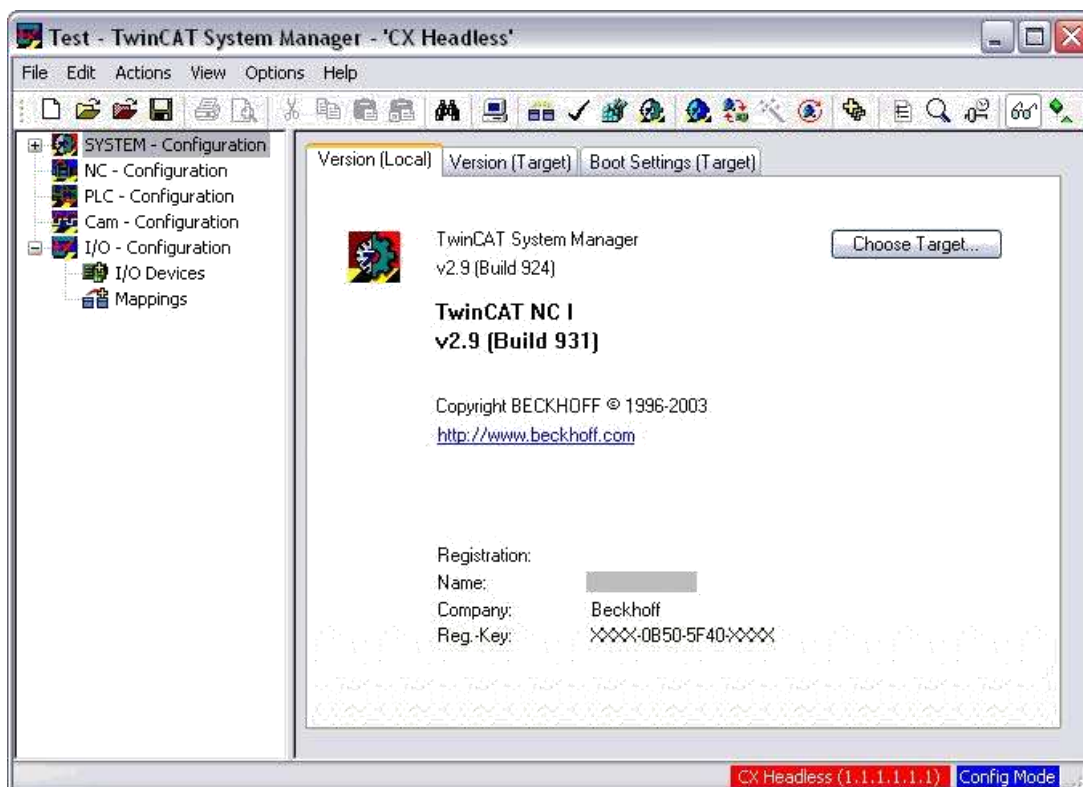
TwinCAT CNC poskytuje všechny CNC funkce jako čistě softwarové řešení. Pokrývá kompletní škálu klasické CNC řízení polohy. Může pracovat až s 64 osami nebo řízenými vřeteny. [23]



4.2.2 TwinCAT System Manager

TwinCAT System Manager je hlavním nástrojem pro konfiguraci celého TwinCAT systému. Je zde prováděno základní nastavení, a jsou zde spravovány fyzické vstupy a výstupy z připojených sběrnic a vstupy a výstupy jednotlivých softwarových úloh. Přidávají se zde PLC projekty a provádí se jejich nastavení (počet run-time systémů, doba cyklu, atd.). Je zde i NC konfigurace, kde se vytváří požadované osy a nastavují se jejich parametry. Osy je možno také řídit přes odpovídající online dialog.

Při programování softwarových úloh (PLC úlohy) není nutné znát typ sběrnice. Programování se provádí pomocí softwarových proměnných, které system manager posléze spojuje s dalšími proměnnými. Ty buď odpovídají reálným vstupům a výstupům na sběrnici, nebo softwarovým proměnným v jiné úloze. Jednotlivé softwarové úlohy pracují s vlastními proměnnými a namapované adresy proměnných jsou platné pouze v rámci úlohy.



Obr. 45 TwinCAT System Manager [23]

TwinCAT systém pracuje v několika režimech, které jsou ovládány a zobrazeny v system manageru. Jsou umístěny v pravém horním rohu a jsou i barevně odlišeny.

- Červená označuje, že je systém TwinCATu zastaven.
- Modrá označuje Config mód, kde se nastavují všechny parametry, přidávají a odebírají se PLC programy, zařízení, atd.
- Žlutá barva označuje spouštění programu.
- Zelená barva označuje run mód. Je spuštěn run-time a program. [23]

4.2.3 TwinCAT PLC Control

TwinCAT PLC Control je kompletní vývojové prostředí pro PLC. Obsahuje nástroje pro programování, spouštění a ladění PLC programů. Programování se provádí pomocí programovacích jazyků z mezinárodní normy IEC 61131–3 pro programovatelné automaty. PLC Control tedy umožňuje programovat ve dvou textových a ve čtyřech grafických programovacích jazycích.

Instruction list (IL)

Prvním textovým programovacím jazykem je Instruction list, neboli seznam instrukcí. Jazyk se skládá ze série instrukcí, kde každá instrukce začíná na novém řádku a obsahuje operátor a v závislosti na typu operace, jeden nebo více operandů, oddělených čárkami. Na začátku instrukce může být identifikační značka následovaná dvojtečkou. Komentář musí být poslední prvek na řádku. Mezi instrukce mohou být vloženy prázdné řádky.

```
LD 2
MUL( 2
ADD 3
)
ST Erg
```

Obr. 46 Příklad – instruction list [23]

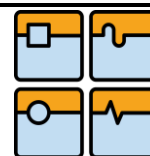
Structured text (ST)

Druhým textovým programovacím jazykem je strukturovaný text. V případě tohoto jazyka se jedná o programovací jazyk vyšší úrovně, protože používané příkazy nejsou strojově orientované. Srovnatelné programovací jazyky vyšší úrovně jsou Basic, PASCAL nebo C.

Strukturovaný text nabízí předdefinované struktury pro některé často používané konstrukce, jako jsou smyčky. Skládá ze série instrukcí, které mohou být podmíněny (IF), nebo mohou být prováděny ve smyčkách (WHILE, FOR, REPEAT). Výrazy (Expression) se skládají z operátorů a operandů, je to konstrukce, která vrací hodnotu poté, co je vyhodnocena. Operandů mohou být konstantní, proměnné, volání funkce nebo jiný výraz. Vyhodnocení výrazů probíhá zpracováním operátorů podle určitých pravidel. Operátor s nejsilnější vazbou je zpracován jako první, pak operátor s druhou nejsilnější, atd. Operátory se stejně silnými vazbami jsou zpracovávány zleva doprava.

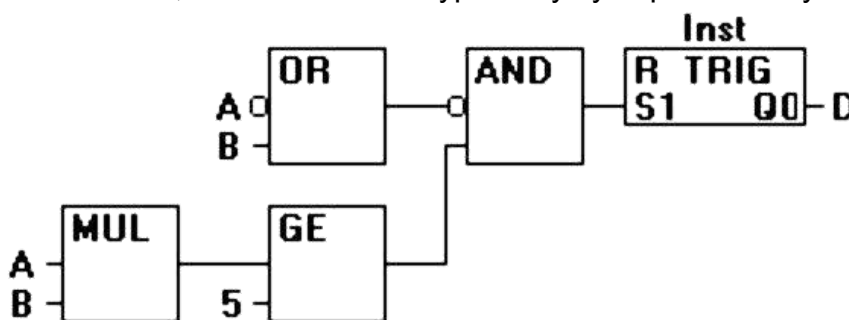
```
IF value < 7 THEN
  WHILE value < 8 DO
    value := value + 1;
  END_WHILE;
END_IF;
```

Obr. 47 Příklad – structured text [23]



Function block diagram (FBD)

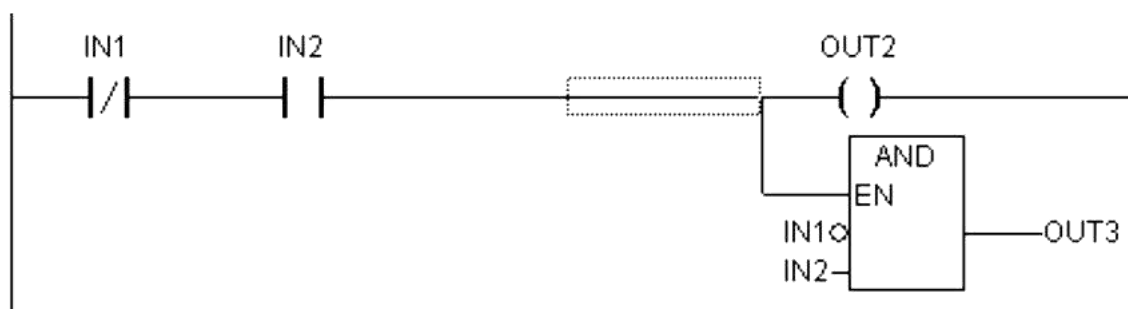
Funkční blokový diagram je graficky orientovaný programovací jazyk. Struktura programu je rozdělena na funkčně-orientované logické sekvence, které představují buď logický, nebo aritmetický výraz, volání funkčního bloku či skok. Sekvence se skládají z pospojovaných funkčních bloků. V rámci jedné sekvence je směr vyhodnocení vždy zleva doprava. Všechny vstupní hodnoty musí být vygenerovány před provedením jednotlivých funkčních bloků. Vyhodnocení jedné sekvence není hotové, dokud nebudou vypočteny výstupní hodnoty všech prvků.



Obr. 48 Příklad – function block diagram [23]

Ladder diagram (LD)

Ladder diagram by se dal přeložit jako žebříkový diagram. Je to grafický programovací jazyk, který svou strukturou připomíná elektrický obvod. Tento způsob programování je vhodný pro operace, kde je potřeba reléová logika nebo pro řízení volání ostatních programů. Ladder diagram se skládá ze série sítí. Sítě jsou na levé a pravé straně omezeny levou a pravou vertikální proudovou linií. Mezi nimi je schéma obvodu tvořené kontakty, cívkami a vedením nebo i funkčními bloky a programy, které ale musí mít na vstupu a výstupu logické hodnoty.



Obr. 49 Příklad – ladder diagram [23]

Continuous function chart (CFC)

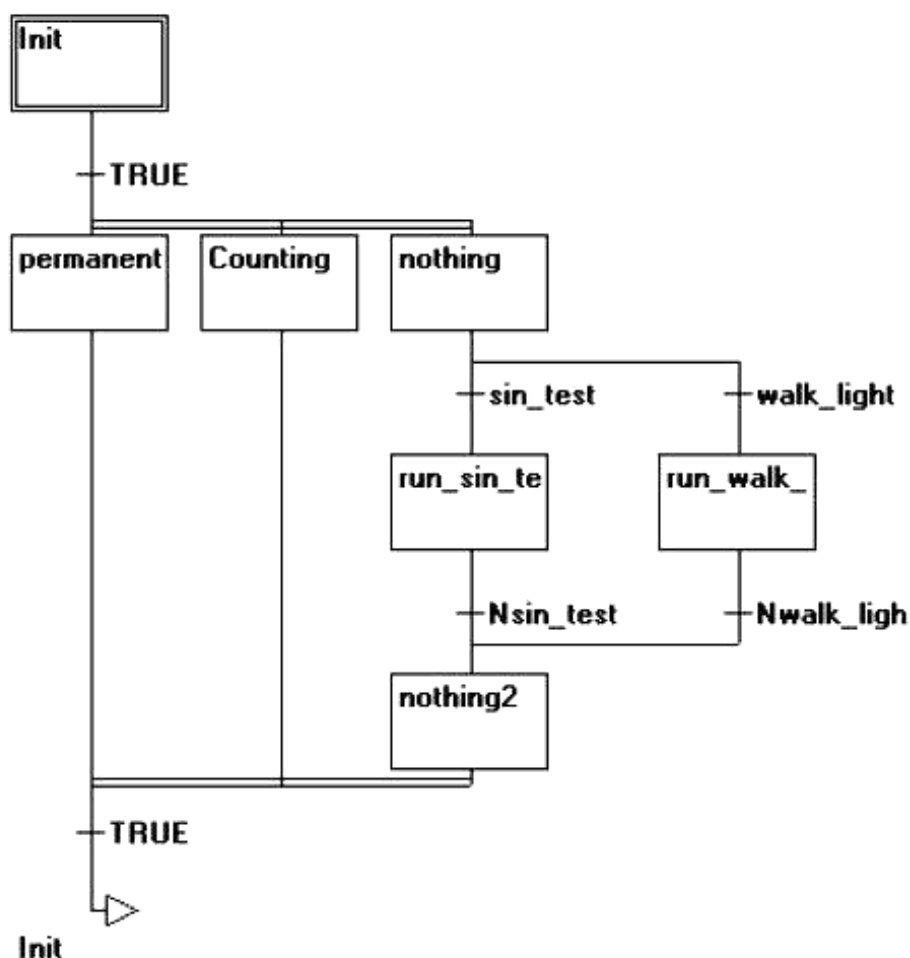
Průběžný funkční diagram je podobný funkčnímu blokovému diagramu (FBD), ale nepracuje se sekvencemi. Pracuje s volně umístěnými prvky, které jsou spojené. Toto uspořádání umožňuje zpětnou vazbu.



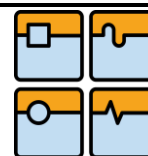
Obr. 50 Příklad – continuous function chart [23]

Sequential function chart (SFC)

Sekvenční funkční diagram je grafický programovací jazyk, kterým lze popsat v chronologickém pořadí různé akce v rámci programu. Úkoly jsou rozděleny do přehledných částí programu (kroků). Jednotlivé kroky se provádějí, jen když jsou aktivní. Sekvence mezi těmito kroky jsou pak definovány v grafické podobě a podmínky v těchto přechodech musí být splněny, aby program mohl přejít na další krok. Samotné kroky jsou pak napsány v jiném programovacím jazyce, nebo v něm může být další SFC diagram. [23]



Obr. 51 Příklad – sequential function chart [23]



Struktura PLC projektu se skládá z POU (Program Organization Unit), datových typů, zdrojů (globální proměnné, konfigurace PLC) a knihoven. Každá POU obsahuje deklarační část a tělo, které je napsáno v jednom z programovacích jazyků. Mezi POU se počítají funkce, funkční bloky a programy, které mohou být doplněny akcemi.

Proměnná

Proměnné mohou být deklarovány buď lokálně v seznamu globálních proměnných, nebo v deklarační části POU, kde jsou definovány mezi klíčovými slovy VAR a END_VAR. Identifikátor proměnné nesmí obsahovat žádné mezery ani speciální znaky a může být použit jen jednou. Dále se musí deklarovat datový typ a můžou se určit adresy pro vstupy a výstupy. Adresy, které nejsou zcela deklarovány, se nahradí hvězdičkou.

Funkce

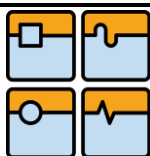
Funkce je POU, která poskytuje na výstupu pouze jeden datový prvek. Na vstupu však může být prvků více. Funkce se tedy přiřazuje k výstupní proměnné. Ve strukturovaném textu se volání funkce může objevit jako operand. Funkce nemají žádné vnitřní podmínky. To znamená, že volání funkce se stejnými vstupními parametry, vždy vytvoří stejnou hodnotu na výstupu.

Funkční blok

Funkční blok poskytuje v svém průběhu více hodnot. Na rozdíl od funkce, funkční blok neposkytuje na výstupu návratovou hodnotu, ale více výstupních proměnných. Každé použití funkčního bloku vyžaduje vytvoření instance. Každá instance má vlastní identifikátor (název instance) a datovou strukturu, která obsahuje jeho vstupy, výstupy a interní proměnné. Instance jsou deklarovány lokálně nebo globálně jako proměnné. Typ identifikátoru je název funkčního bloku. Všechny hodnoty zůstávají zachovány i po zpracování funkčního bloku, dokud není zpracován znovu. Z toho vyplývá, že i když je funkční blok volán se stejnými vstupními parametry, ne vždy vrátí stejné výstupní hodnoty.

Program

Program během svého spuštění vrací několik hodnot. Nelze ho volat ve funkci a na rozdíl od funkčního bloku, program nemá žádné instance. Pokud POU volá program, a pokud dojde ke změně hodnot v programu, pak tyto změny jsou zachovány, až do příštího spuštění programu, i když je volán z jiného POU. [23]



4.3 PLC program pro řízení osy

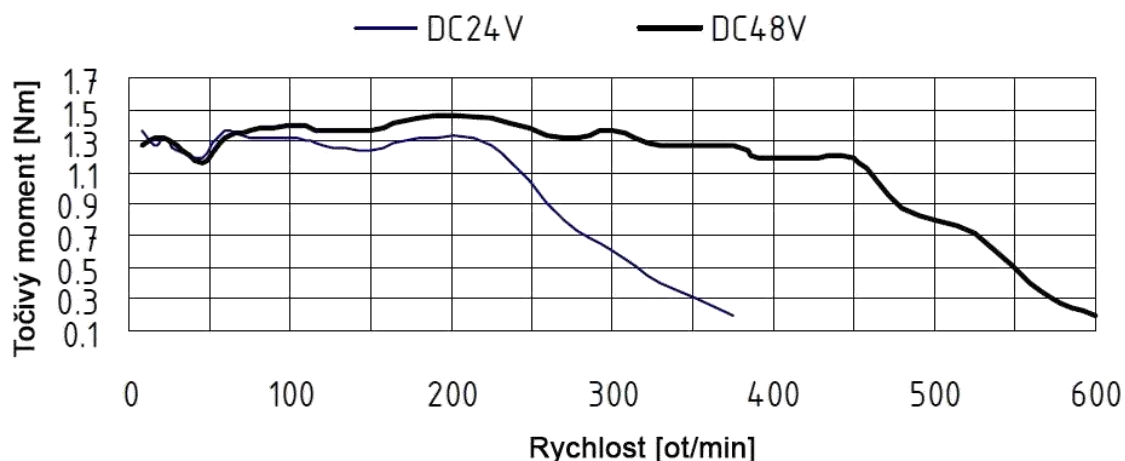
V době, kdy byl vytvářen PLC program pro řízení osy, nebyla ještě osa s lineárním motorem provozu schopná. Architektura PLC programu je ale taková, že nezáleží na tom, jakou osu respektive motor bude program řídit. V system manageru se připojí a nastaví PLC program, kterým bude motor řízen. Dále se zde nastaví parametry motoru, odměřování, atd. Následně se slinkují všechny potřebné softwarové proměnné z PLC programu s reálnými vstupy a výstupy. Takže PLC program lze připojovat k různým motorům, záleží na nastavení system manageru, případně se program jen lehce upraví.

PLC program pro řízení osy byl vytvářen a optimalizován na vrtačko – frézce OPTI BF20 Vario od německého výrobce Optimum Maschinen. Byla ovšem využita jen jedna osa a to osa X, která je poháněná krokovým motorem 23H280–01EA.

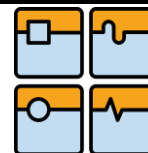


Obr. 52 OPTI BF20 Vario – křížový stůl

Krokový motor 23H280–01EA má točivý moment $2 \text{ Nm} \pm 10\%$ a úhel jednoho kroku je $1,8^\circ$. Délka stolu osy X je 500 mm a rozsah posuvu 280 mm. [41] Největší rychlost jakou je osa schopna s krokovým motorem dosáhnout je 14 mm/s, což je pro potřeby optimalizace programu přívětivější, než velice dynamická osa s lineárním motorem. Zde je vždy dost času na to aby se dala osa bezpečně zastavit, než by došlo k havárii.



Obr. 53 Charakteristika motoru 23H280–01EA [42]



4.3.1 Knihovny

Knihovny poskytují funkce a funkční bloky, stejně tak jako datové typy, globální proměnné a vizualizace, které mohou být použity v rámci projektu, stejně jako ostatní POU a proměnné, které jsou definovány přímo v projektu. [23]

Library Manager funguje v PLC Control jako správce knihoven. Zobrazuje všechny knihovny, které jsou spojené s projektem. Umožňuje je samozřejmě také pohlížet a přidávat či odebírat.

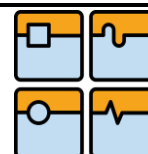
Tab. 10 Knihovny použité v projektu pro řízení osy [23]

Standard.lib	Tato knihovna je k dispozici vždy. Obsahuje všechny funkce a funkční bloky, které jsou vyžadovány jako standart pro IEC programovací systém.
TcSytem.lib	Tato knihovna obsahuje základní funkce. Např. manipulace se soubory a proměnnými, definice systémové struktury, atd.
TcUtilities.lib	Knihovna, která obsahuje funkce pro ovládání operačního systému, PLC a TwinCAT systému. Např. restart systému, vypnutí systému, reset PLC, atd.
TcEtherCAT.lib	Knihovna obsahuje funkční bloky, které mohou vykonávat funkce s EtherCAT zařízením a dalšími zařízeními, které jsou k němu připojeny.
TcBaseMath.lib	Knihovna obsahuje základní matematické funkce.
TcMath.lib	Knihovna obsahuje rozšířené matematické funkce.
TcMC2Drive.lib	Funkční bloky této knihovny používají informace o NC ose. Používají údaje o přístupu k jednotce (ID, adresa a číslo kanálu).
TcMC2.lib	Knihovna obsahuje funkční bloky pro řízení pohybu osy.
TcNC.lib	Knihovna pro NC řízení osy.
TcNCCfg.lib	Knihovna poskytuje funkční bloky pro hlavní nastavení NC os přímo z PLC. Obsahuje bloky pro konfiguraci interpolační skupiny.
TcNCI.lib	Knihovna obsahuje funkční bloky pro řízení NC interpretu.

4.3.2 Datové typy

Tab. 11 Použité datové typy [23]

BOOL	Tento 8 bitový datový typ může nabývat pouze logických hodnot TRUE nebo FALSE.
INT	16 bitový celočíselný datový typ, který může nabývat hodnot -32768 až 32767.
UINT	16 bitový celočíselný nezáporný datový typ, který může nabývat hodnot 0 až 65535.
UDINT	32 bitový celočíselný nezáporný datový typ, který může nabývat hodnot 0 až 4294967295.
LREAL	Pro zapisování racionálních čísel. Datový typ s pohyblivou desetinou čárkou o velikosti 64 bitů.
STRING	Proměnná s tímto datovým typem může obsahovat libovolný řetězec znaků. Pokud není velikost určena jinak, tak je výchozí velikost 80 + 1 bajtů.
AXIS_REF	Tento datový typ obsahuje informace o ose a funguje jako rozhraní mezi PLC a NC. Skládá se z několika datových struktur. Struktura PlcToNc odesílá z PLC informace o řízení do NC. Struktura NcToPlc obsahuje základní údaje o stavu osy (poloha, rychlost), které jsou cyklicky obnovovány. Další struktura Status obsahuje další informace o stavu osy, ty se ale aktualizují jen prostřednictvím PLC programu.
NciChannelToPlc	Tato struktura zajišťuje cyklickou výměnu dat z kanálu NC Interpretru do PLC. Obsahuje například informace o stavu interpretru, kód chyby, ID kanálu nebo identifikaci M-funkcí. Struktura má velikost 150 bajtů.
NciChannelFromPlc	Tato struktura zajišťuje cyklickou výměnu dat z PLC do kanálu NC Interpretru. Obsahuje například override osy a vřetene nebo potvrzení M-funkcí. Struktura má velikost 150 bajtů.



4.3.3 Konstrukce PLC programu

Celý PLC program pro řízení osy je napsán ve strukturovaném textu. Hlavní program, který se ve smyčce vždy spustí, a z kterého se spouštějí ostatní programy, se nazývá MAIN. Skládá se z několika podprogramů, které jsou postupně spouštěny, jak je vidět na obr. 54.

```
0001 PROGRAM MAIN
0002 VAR
0003 END_VAR
0004
0005 (*Inicializace*)
0006 Initialization();
0007
0008 (*Nabuzení motoru, reset a stop*)
0009 PRG_Power();
0010
0011 (*Nastavení pozice*)
0012 PRG_Positioning();
0013
0014 (*Řízení vizualizace*)
0015 Visual();
0016
0017 (*Výběr režimu řízení*)
0018 IF visualization_JOG = TRUE
0019 THEN
0020     PRG_JOG();
0021 ELSIF visualization_NC = TRUE
0022 THEN
0023     PRG_NC();
0024 END_IF
0025
```

Obr. 54 Program MAIN

Inicializace

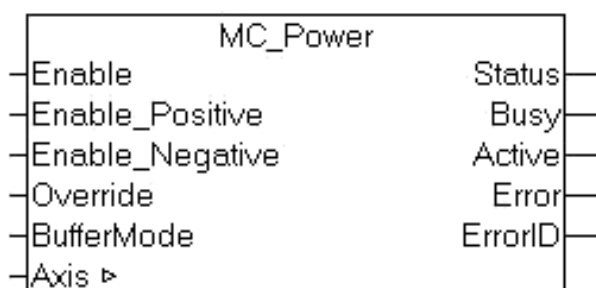
Při spuštění programu může v proměnných zůstat hodnota po předchozím spuštění. Proto je zde program Initialization, který při vyvolání z ovládacího panelu vizualizace, nastaví všechny potřebné hodnoty do výchozího stavu.

Nabuzení motoru, reset a stop

Dalším spouštěným programem je PRG_Power. Tento program nemá žádnou podmínku spuštění a proběhne při každém cyklu. Obsahuje funkční bloky, které jsou nezbytně nutné pro fungování osy. Hlavním prvkem programu je funkční blok MC_Power. Ten zajišťuje nabuzení motoru a povoluje pohyb v jednotlivých směrech. Dále se v něm nastavuje override, což je procentuální nastavení rychlosti pohybu. Může tedy nabývat hodnot 0 až 100, kdy normální plná rychlost je 100.

Obr. 55 ukazuje funkční blok MC_Power, zapsaný v jazyce strukturovaný text a v jazyce funkční blokový diagram.

```
MC_Power(
  Axis:= ,
  Enable:= ,
  Enable_Positive:= ,
  Enable_Negative:= ,
  Override:= ,
  BufferMode:= ,
  Status=> ,
  Busy=> ,
  Active=> ,
  Error=> ,
  ErrorID=> );
```



Obr. 55 Funkční blok MC_Power [23]

Dalším prvkem v programu PRG_Power je funkční blok MC_Stop, který při aktivaci zastaví pohyb osy podle definovaných parametrů a po dobu, co je aktivní, také blokuje všechny příkazy k pohybu. Posledním prvkem je funkční blok MC_Reset, který při vyvolání resetuje osu.

Nastavení pozice

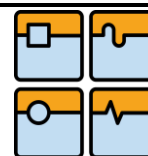
Program PRG_Positioning obsahuje pouze funkční blok MC_SetPosition, kterým lze nastavovat aktuální hodnotu pozice.

Řízení vizualizace

Z programu Visual je řízeno zobrazování jednotlivých ovládacích panelů ve vizualizaci pro ruční nebo NC řízení. Ve vizualizaci se rozhoduje, která ze dvou proměnných (visualization_JOG nebo visualization_NC) bude aktivní a je přitom zajištěno, že nemohou být aktivní obě proměnné zároveň.

Výběr režimu řízení

Hlavní programovou smyčku uzavírá podmínka pro výběr řízení. Podle volby provedené na ovládacím panelu vizualizace se v jednoduché podmínce rozhoduje, jestli se spustí program pro ruční řízení osy PRG_JOG nebo program pro NC řízení osy PRG_NC.



Vizualizace

Ovládání celého programu probíhá z ovládacího panelu vizualizace viz. obr. 56. Ovládací panel byl navrhnut tak aby se dal bezproblémově ovládat z dotykové obrazovky. Všechny prvky jsou tedy dostatečně velké s jednoduchým popisem. Ke každému prvku je přiřazena jedna nebo více proměnných, které jsou těmito prvky buď ovládány, nebo zobrazovány.

Tlačítka jsou tvořena obdélníky s popisem, které při aktivaci změni barvu. Barevné odlišení zůstává aktivní po dobu provádění příkazu spojeného s tlačítkem nebo do té doby než dojde k jeho deaktivaci. Z obdélníků jsou tvořeny i prvky, které slouží pouze k zobrazování. Ovšem místo statického popisu zobrazují aktuální hodnoty přiřazených proměnných. V případě potřeby zadání nějaké hodnoty čísla nebo textu přímo z obrazovky se zobrazí klávesnice s čísly nebo i textem (tzv. numpad a keypad). Posledním prvkem využívaným ve vizualizaci je posuvník (scrollbar), sloužící pro zadání hodnoty v omezeném rozsahu.



Obr. 56 Hlavní ovládací panel vizualizace

V levém horním rohu se nachází tlačítko pro inicializaci programu. Pod ním jsou ovládací prvky pro aktivaci jednotlivých funkčních bloků z programu PRG_Power – nabuzení motoru, reset a stop. V dolní části se nachází posuvník pro nastavení hodnoty override. Uprostřed panelu jsou tlačítka pro výběr režimu řízení. Aktivací jednoho z tlačítek dojde k zobrazení jednotlivých panelů pro řízení osy. Panely se zobrazí pod hlavním panelem. Tlačítka JOG a NC nemohou být aktivní obě současně. Při aktivaci jednoho tlačítka se zablokuje použití druhého a naopak. Panel dále obsahuje ukazatele aktuální pozice a aktuální rychlosti. Proměnné těchto prvků jsou přímo z datové struktury AXIS_REF – ActPos a ActVelo. Posledním prvkem na panelu je nastavení pozice, kdy po stisknutí tlačítka nastav pozici, dojde k nastavení hodnoty pozice, která je nad ním.

4.3.4 Ruční řízení osy

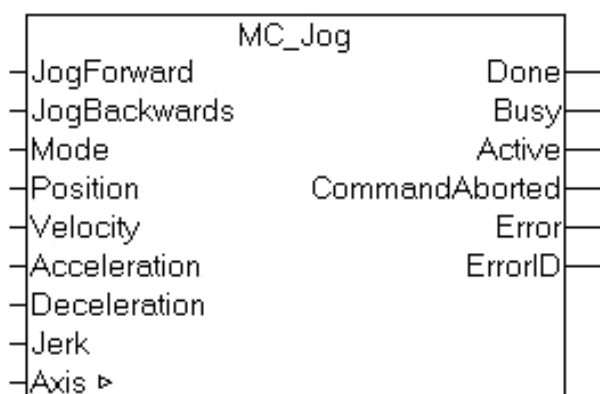
Při stisknutí tlačítka JOG na ovládacím panelu se splní podmínka v MAIN programu a spustí se program PRG_JOG, který obsluhuje ruční řízení osy.

Funkční bloky ručního řízení

Ústředním prvkem programu je funkční blok MC_JOG, který zajišťuje již zmíněné ruční řízení (obr. 57). Po přivedení signálu TRUE na vstup JogForward se osa začne pohybovat v plusovém směru a po přivedení signálu na JogBackwards se zase začne pohybovat v opačném směru. V případě, že bude signál na obou vstupech, tak platí, že přednost má JogForward.

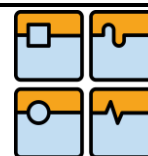
MC_JOG může pracovat v několika různých módech:

- MC_JOGMODE_STANDARD_SLOW – Osa se pohybuje tak dlouho, dokud je signál na jednom ze vstupů. A pohybuje se rychlostí, která je nastavená v system manageru jako nízká rychlost pro manuální funkce.
- MC_JOGMODE_STANDARD_FAST – Osa se chová stejně jako v předchozím případě, ale pohybuje se rychlostí, která je nastavená v system manageru jako vysoká rychlost pro manuální funkce.
- MC_JOGMODE_CONTINUOUS – Osa se pohybuje tak dlouho dokud, je signál na jednom ze vstupů. A jsou použity hodnoty rychlosti a dynamiky uvedené ve funkčním bloku.
- MC_JOGMODE_INCHING – S vzestupnou hranou signálu na jednom ze vstupů se osa posune o určitou vzdálenost, která je zadána ve funkčním bloku. Údaje o rychlosti a dynamice jsou také použity z funkčního bloku.

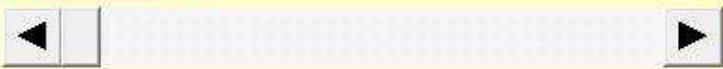



Obr. 57 Funkční blok MC_JOG [23]

Dalším použitým funkčním blokem je MC_MoveAbsolute, který zajišťuje absolutní polohování osy. Po aktivaci funkčního bloku je osa polohována do zadané polohy. Posledním použitým funkčním blokem je MC_Home, který zajišťuje referencování osy. Režim referencování je nastaven v system manageru.



Vizualizace ručního řízení

Inicializace programu		Výběr režimu řízení		Aktuální pozice 0.000	
Nabuzení		JOG	NC	Aktuální rychlost 0.000	
Reset				Nastavení pozice 0.000	
Stop				Nastav pozici	
				0 Override	
				5 Rychlost	
-Pohyb		+Pohyb		Najetí do reference	
Krokování				Najetí do pozice 0.000	
-Krok	0.000	+Krok		Jed' do pozice	

Obr. 58 Ovládací panel pro ruční řízení osy

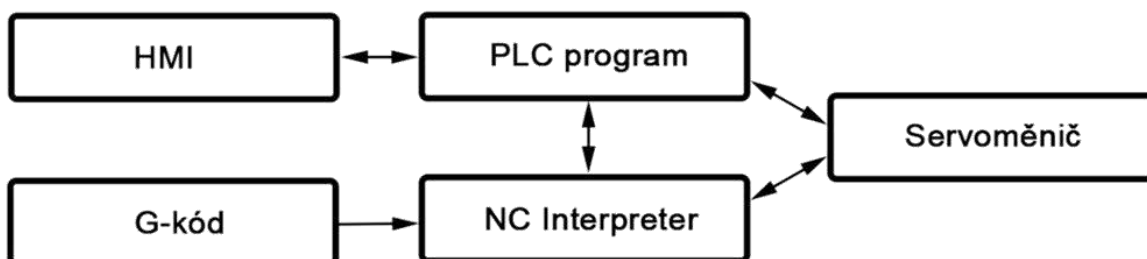
Pro ruční ovládání osy je použit funkční blok MC_JOG v módu MC_JOGMODE_CONTINUOUS, kdy tlačítko +Pohyb ovládá proměnnou na vstupu JogForward a tlačítko – Pohyb ovládá proměnnou na vstupu JogBackwards. Rychlost je zadávána na posuvníku nad tlačítky.

Další funkce je krokování neboli relativní posuv v ose. MC_JOG je nastaven do módu MC_JOGMODE_INCHING. Osa se posune v plusovém nebo minusovém směru o hodnotu zadanou do pole mezi tlačítky pro krokování. Hodnota rychlosti je opět zadána na posuvníku.

Tlačítko Jed' do pozice ovládá absolutní pohyb v ose, kdy po jeho aktivaci se začne osa polohovat do pozice zadané nad tlačítkem. Poslední tlačítko Najetí do reference aktivuje funkční blok MC_HOME.

4.3.5 NC řízení osy

NC řízení osy (Numeric Control) neprobíhá ručně, ale automaticky podle předem vytvořeného programu. K tomuto účelu slouží v TwinCAT systému tzv. NC Interpreter, jeho fungování je zjednodušeně zobrazeno na obr. 59.



Obr. 59 Blokové schéma NC řízení

NC interpreter je spouštěn a obsluhován z nadřazeného PLC programu, který je ovládán z HMI rozhraní. Do NC interpretu potom ještě vstupují naprogramované instrukce v podobě G-kódu, podle kterých potom osu řídí. NC interpreter si průběžně vyměňuje informace s PLC programem, který do běhu osy může samozřejmě také zasahovat.

G-kód

G-kód je programovací jazyk, kterým jsou vytvářeny programy pro NC řízení. NC program je složen z ASCII znaků, složených do sekvencí NC bloků, které jsou pod sebou v řádcích. NC program je pak vyhodnocován znak po znaku, řádek po řádku.

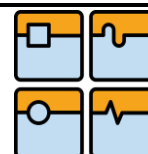
Struktura takového programu se skládá ze startu programu, kde je uveden název programu (tato část je ale volitelná). Dále z jednotlivých NC bloků a nakonec je zakončení programu.

NC bloky se skládají z NC slov, což jsou instrukce pro vykonání jednotlivých funkcí. První znak NC slova určuje jeho význam. Jde především o písmeno G (proto G-kód), slova, která začínají tímto písmenem, určují hlavní instrukce tzv. G-funkce. Dále to jsou M-funkce, které obsahují doprovodné funkce. Slova označující jednotlivé NC bloky začínají písmenem N. Písmeny X, Y, Z začínají rozměrové údaje. F, S označují rychlostní údaje a T, D nástrojové funkce. [23]

Příklad G-kódu:

```

%Příklad   (Start programu)
N10 F480
N20 G00 X20 Y100
N30 G01 X0 Y20
N40 G01 X-6 Y50 Z30
M30       (Konec programu)
  
```



G-kód je jako programovací jazyk normalizován, přesto však tento standard většina firem nedodržuje a rozšiřují si ho podle svých požadavků. Tab.10 ukazuje vybrané funkce G-kódu, které jsou systémem Beckhoff podporovány.

Tab. 12 Vybrané funkce G-kódu [23]

G00	Rychlý pojezd
G01	Lineární interpolace
G02	Kruhová interpolace
G04	Časová prodleva
G09/G60	Přesné zastavení
G17	Volba pracovní roviny X-Y
G18	Volba pracovní roviny Z-X
G71	Metrické rozměrové značení
G74	Referencování
G90	Absolutní programování
G91	Inkrementální programování
M03	Zapnutí vřetene
M05	Vypnutí vřetene
M17	Konec podprogramu
M30	Konec programu
N	Číslo řádku
X	Absolutní pozice na ose X
Y	Absolutní pozice na ose Y
Z	Absolutní pozice na ose Z
F	Rychlost pohybu
S	Rychlost vřetene
T	Výběr nástroje

Program pro NC řízení

Program pro NC řízení osy se nazývá PRG_NC a je spuštěn při splnění podmínky v hlavím programu. PRG_NC zajišťuje kompletní obsluhu NC Interpretru. Program je řízen podle dvou prvků, první je číselná proměnná ProgStatus, která je měněna v závislosti na tom, v jaké fázi se program nachází. Vždy po úspěšném splnění nějakého funkčního bloku se do proměnné zapíše číselná hodnota, která označuje, že byla daná část programu splněna, a že se může pokračovat v programu dále. V případě, že by se část programu nacházela ve stavu chyby, tak se do proměnné ProgStatus zapíše hodnota, která nasměruje program do bloku s chybovým hlášením. Druhý prvek je stav interpretru, který je zjišťován na začátku programu příkazem ltpGetStateInterpreter.

Na začátku programu také vždy proběhne vložený podprogram pro řízení vizualizace NC panelu. Dále proběhne nastavení overridu NC interpretru, konkrétně příkazem ltpSetOverridePercent. Hodnota overridu je, stejně jako pro ruční řízení, nastavena na hlavním ovládacím panelu. Následně je proveden příkaz ltpGetError, který zjistí případnou chybu interpretru a zapíše do proměnné ErrorID její kód.

Většina následujících funkčních bloků je uzavřena v jednoduché podmínce, kdy k jejímu splnění je třeba aktivovat tlačítko pro povolení NC programu. Nejprve po splnění podmínky je vytvořena 3D interpolační skupina, pomocí funkčního bloku CfgBuild3DGroup. Protože bude použita jen jedna osa, tak bude do bloku zadána pouze osa X.

Dále je potřeba nahrát do interpretru příslušný soubor s NC kódem. To se provádí funkčním blokem ltpLoadProgEx, kde je třeba zadat pouze jméno souboru s cestou, délku jména a kanál. Pokud není zadána celá cesta k souboru, tak je soubor hledán ve výchozím adresáři C:\TwinCAT\cnc.

Pokud byl soubor úspěšně nahrán, tak se stav interpretru změní z IDLE na READY a interpreter je tak připraven na spuštění programu. To se provádí funkčním blokem ltpStartStopEx, který slouží, jak ke spouštění, tak i k zastavení programu. Pro spuštění je třeba, aby na vstupu bStart byla hodnota TRUE a na vstupu bStop zase FALSE.

Program je možné kdykoliv během jeho běhu pozastavit. K tomu účelu slouží funkční blok ltpEStopEx. Opětovné spuštění se provede funkčním blokem ltpStepOnAfterEStopEx.

Mimo počáteční podmínku povolení NC programu se nachází zastavení programu, které je provedeno, jak již bylo uvedeno, funkčním blokem ltpStartStopEx. Jen na vstupu bStop je přivedena hodnota TRUE.

Reset interpretru se také nachází mimo počáteční podmínku. Reset je využíván po skončení programu, a nebo pokud interpreter hlásí chybu. Skládá se z několika částí. První je samotný reset interpretru, který se provádí funkčním blokem ltpResetEx2. Posléze je funkčním blokem CfgReconfigGroup odstraněna 3D interpolační skupina. A na závěr jsou proměnné v programu PRG_NC uvedeny do původního stavu.

Vizualizace NC řízení

Vizualizace ovládacího panelu NC je řízena podprogramem VisualNC, který podle hodnoty proměnné ProgStatus povoluje použití jednotlivých tlačítek. Takže zabraňuje stisknutí určitých tlačítek, které jsou pro danou část programu nepotřebné.



Obr. 60 Ovládací panel pro NC řízení osy

Ovládací panel obsahuje tlačítko pro povolení celého NC programu. Dále tlačítka pro ovládání interpretu – start, stop, načítání a reset programu. Tlačítko pro pauzu programu se v případě použití zamění za tlačítko pro pokračování v programu. Při aktivaci prvku pro zadání cesty k souboru se zobrazí keypad, aby ji bylo možné zapsat i na dotykové obrazovce. Panel také obsahuje dva ukazatele, první informuje o stavu interpretu a druhý zobrazuje kód případné chyby.



Obr. 61 Ovládací panel v chybovém stavu

Obr. 61 ukazuje ovládací panel, když je interpreter v chybovém stavu. Stav interpretu zobrazuje ABORTED, pole pro zobrazování chyby zčervená a zobrazuje kód chyby. Také se zobrazí hlášení, že program skončil chybou a výzva k resetu interpretu. Konkrétně chyba 16656 hlásí chybu při otevírání souboru – zadaný soubor neexistuje.

4.4 Nastavení system manageru

Funkce system manageru je vysvětlena v kap. 4.2.2. Jsou v něm nastavovány jednotlivé moduly. V tomto případě obsahuje konfiguraci systému TwinCAT, I/O, NC a PLC. Veškeré nastavení system manageru jde uložit do souboru *.tsm. V příloze 3 je obsažen soubor nastavení System manageru pro lineární motor Linear_motor.tsm a nastavení pro osu s krokovým motorem Stepper_motor.tsm.

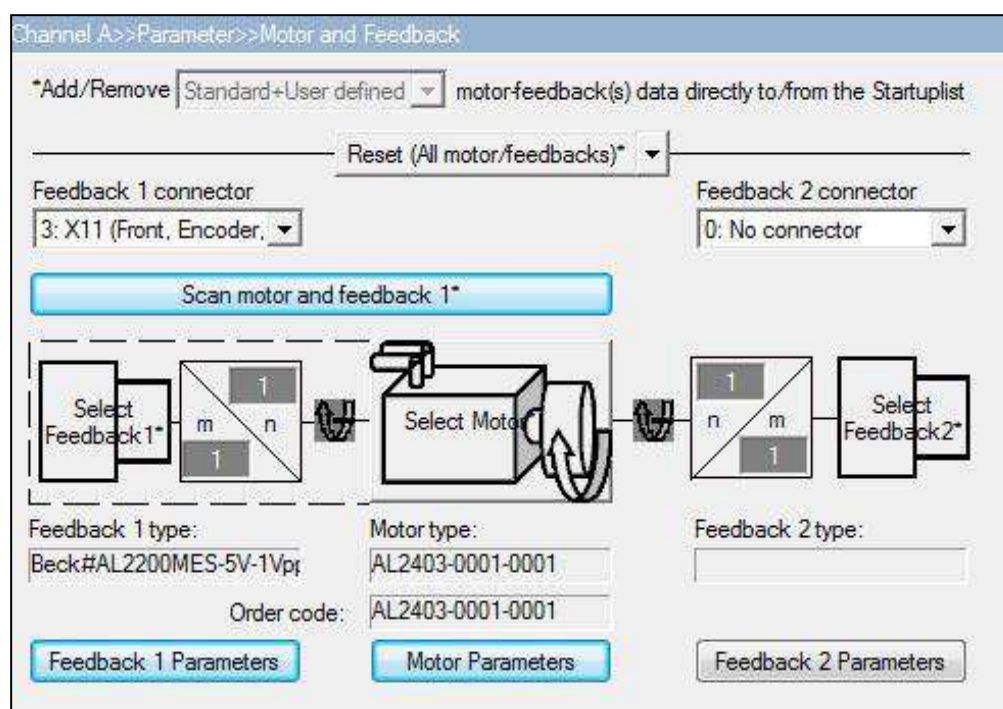
4.4.1 Konfigurace TwinCAT systému

TwinCAT umožňuje ovládání vývojového prostředí ze vzdáleného počítače, který je připojen k jinému počítači, na kterém běží run-time. Pro ovládání prostředí byl využit běžný kancelářský počítač s nainstalovaným TwinCAT systémem. Pomocí funkce Choose Target System byl propojen s průmyslovým PC C6925. Ten je připojen k EtherCAT sběrnici servoměniče AX5601.

Protože je spuštěno několik úloh najednou tzv. multi-tasking, je třeba nastavit prioritu provádění jednotlivých úloh. Priorita je definovaná pouze v rámci systému TwinCAT a měla by být nastavena, tak aby byla u každé úlohy rozdílná. Dále zde lze procentuálně nastavit vytížení procesoru. Zbytek výkonu je použit pro obsluhu operačního systému.

4.4.2 Konfigurace vstupů a výstupů

V záložce I/O Devices pod I/O – Configuration jsou v cílovém systému vyhledávány všechny připojené vstupní a výstupní zařízení. Vyhledání se provádí příkazem Scan device, kterým byl vyhledán měnič Drive1 (AX5106). Po vyhledání měniče se zde provádí i jeho konfigurace. Nastavují se například parametry regulace a parametry připojeného motoru a odměřování.



Channel A>>Parameter>>Motor and Feedback

*Add/Remove motor-feedback(s) data directly to/from the Startuplist

Feedback 1 connector:

Feedback 2 connector:

Diagram showing a motor and feedback loop with 'Select Feedback 1*', 'Select Motor', and 'Select Feedback 2*' blocks.

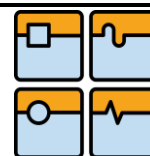
Feedback 1 type:

Motor type:

Feedback 2 type:

Order code:

Obr. 62 Nastavení motoru a odměřování

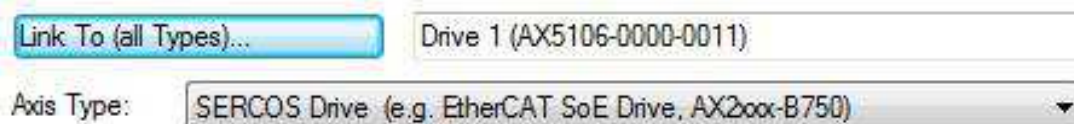


Výhodou je, že TwinCAT obsahuje databázi nastavení motorů a odměřování od různých výrobců. Nastavitelných parametrů je velké množství, proto se načtením parametrů z databáze značně zjednodušuje konfigurace měniče. Jak je vidět na obr. 62, je měnič nastaven na připojený motor AL2403 a na odměřování AL2200.

Pod záložkou Mappings jsou pak vygenerovány propojení (mapy) mezi proměnnými a reálnými vstupy a výstupy. Mapy jsou vytvořeny při spouštění run módu system manageru nebo příkazem Generate Mappings.

4.4.3 Konfigurace NC

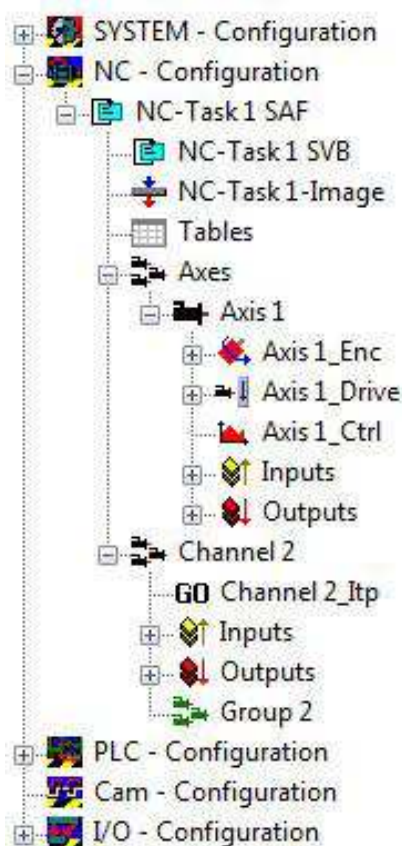
NC – Configuration umožňuje přidávat jednotlivé osy a nastavovat všechny jejich parametry. V záložce Axes je tak pouze jedna osa Axis 1, která je propojena (příkaz Link To) s měničem Drive 1 (AX5106).



Obr. 63 Propojení NC osy s měničem

V parametrech osy lze nastavovat velké množství hodnot. Z těch hlavních to jsou např. použité jednotky, maximální rychlost, rychlost v ručním režimu, zrychlení, zpomalení, jerk, rychlost při referencování. Dále se zde nastavují softwarové koncové snímače. V parametrech snímače polohy (Encoder) se nastavuje např. způsob referencování osy a měřítko osy. Osu lze také ručně řídit z odpovídající záložky online. Vstupy a výstupy Axis 1 jsou spojeny s datovou strukturou AXIS_REF v PLC programu.

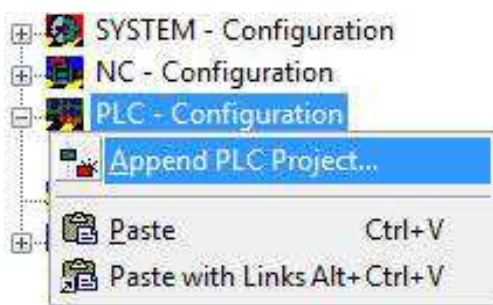
Dalším vytvořeným prvkem v Axes je interpolační kanál Channel 2, který zajišťuje interpolaci os. Kanál obsahuje Skupinu Group 2, kde jsou konfigurovány jednotlivé osy pro 3D interpolaci. V tomto případě je přiřazena pouze Axis 1 jako osa X. Dále obsahuje interpreter Channel 2_Itp, který slouží ke zpracování NC kódu. Zde je možné nastavovat parametry samotného interpreteru, M-funkce, nulové body, nástroje, atd. V záložce Editor je možné sledovat a ručně ovládat interpreter. Vstupy a výstupy interpolačního kanálu jsou opět spojeny s odpovídajícími proměnnými v PLC programu.



Obr. 64 Struktura nastavení

4.4.4 Konfigurace PLC

Připojení PLC projektu probíhá v PLC – Configuration příkazem Append IEC Project. Poté se objeví dialogové okno s výběrem cesty k PLC projektu, konkrétně soubor *.tpy. V tomto případě NC_PLC.tpy.



Obr. 65 Připojení PLC projektu

Po připojení projektu se načtou veškeré vstupy a výstupy v PLC programu. Ty je posléze potřeba příkazem Link to spojit s odpovídajícími vstupy a výstupy v ostatních modulech.

AXIS_REF

Tato datová struktura obsahuje dvě části. Část PLCTONC_AXIS_REF je spojena se vstupem do NC osy a část NCTOPLC_AXIS_REF s výstupem NC osy.

NciChannelToPlc

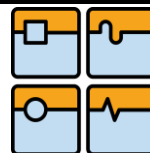
Proměnná s touto datovou strukturou je spojena s výstupem interpolačního kanálu.

NciChannelFromPlc

Proměnná s touto datovou strukturou je spojena se vstupem interpolačního kanálu.

Name:	PlcToNc		
Type:	NciChannelFromPlc		
Group:	Outputs	Size:	150.0
Address:	264 (0x108)	User ID:	0
Linked to...	Channel 2_FromPlc . Inputs . Channel 2 . NC-Task 1 SAF		
Comment:	Variable of IEC1131 project "NC_PLC". Updated with Task "Standard"		
ADS Info:	Port: 801, IGrp: 0xF030, IOffs: 0x108, Len: 150		

Obr. 66 Spojení proměnné PlcToNc s interpolačním kanálem



5 POKUS O OŽIVENÍ OSY

Po nastavení veškerých komponent v konfiguraci měniče se přistoupilo k pokusu o oživení osy. Zde se však objevil problém. Vždy při pokusu o oživení padne osa do chybového stavu. Konkrétně jde o chyby 0xFD15 a 0xF4A5. 0xFD15 je chyba nastavení parametru viz. obr. 68. V překladu znamená, že maximální frekvence zpětné vazby je příliš vysoká. Tento parametr však nebyl v nastavení odměřování nalezen. Chyba 0xF4A5 (obr. 69) je pravděpodobně vyvolána samotným chybovým stavem.

Veškeré nastavení parametrů měniče je načteno z databáze. Motor, odměřování, měnič i samotný systém TwinCAT jsou od firmy Beckhoff, takže při konfiguraci měniče nebyli očekávány žádné problémy s nastavením nebo kompatibilitou.

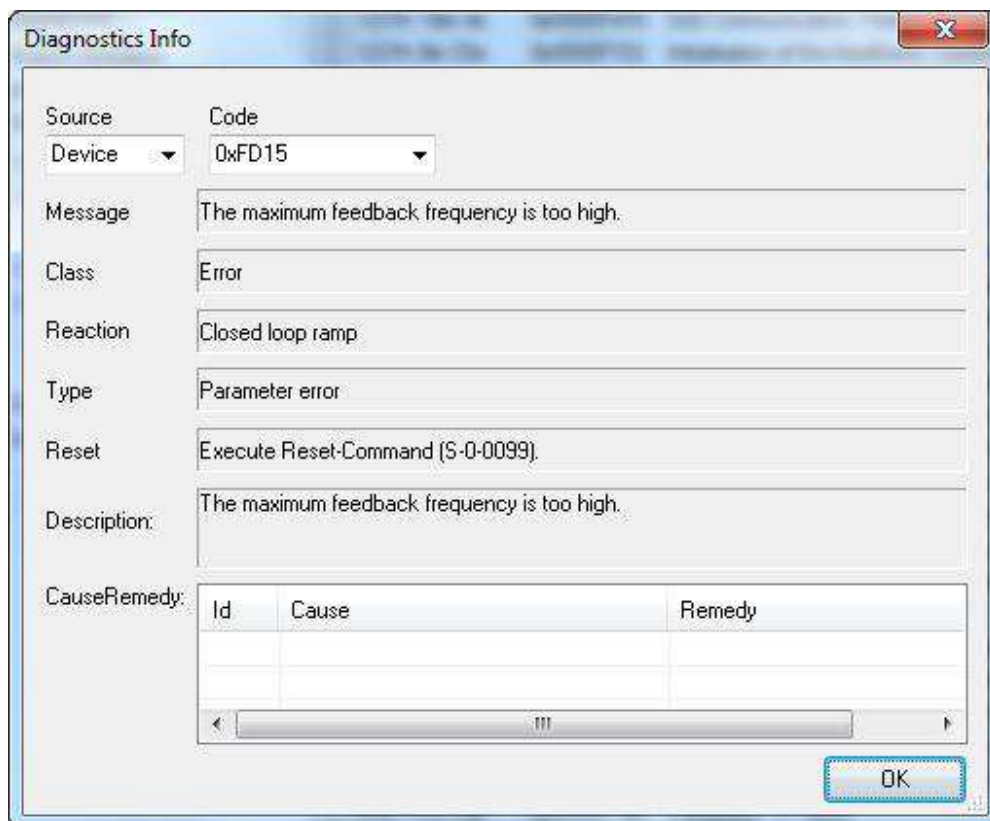
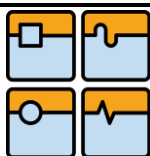
Jak je vidět na obr. 67, počet nastavitelných parametrů odměřování je vysoký. Takže byla požádána o pomoc technická podpora Beckhoffu. Komunikace s ní je však velmi pomalá a v čase vyměřeném pro zpracování této diplomové práce se nepodařilo osu oživit.

The screenshot shows the TwinCAT configuration interface for a Beckhoff motor. The 'Tree' view on the left shows the hierarchy: Device > Channel A > Parameter > Motor and Feedback > Feedback 1. The main window displays the 'Feedback 1' configuration for a Beck#AL2200MES-5V-1Vpp motor. It includes a diagram of the feedback signal path and a list of parameters.

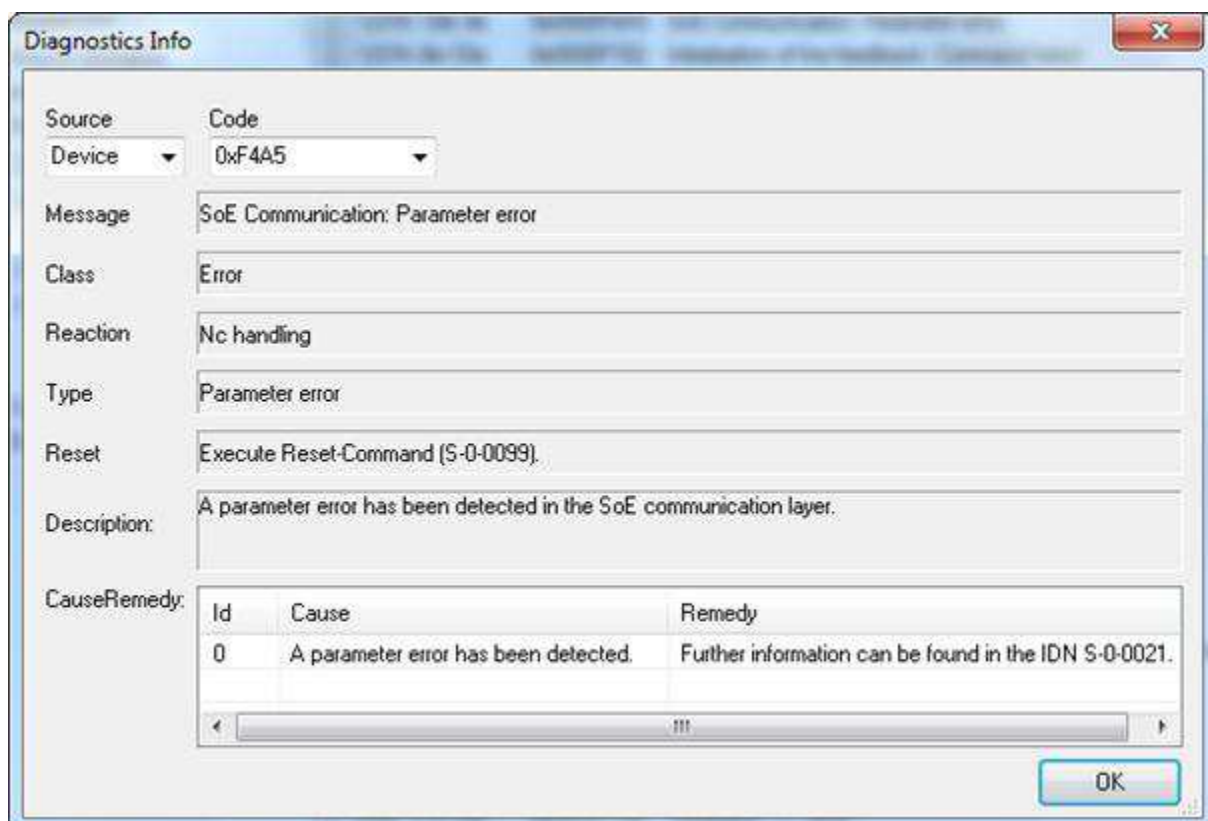
IDN	Name	ActValue	SetValue	Unit
P-0-0150	Feedback 1 type		12: Beckhoff	
	Manufacturer		1: Linear feedback	
	Feedback type		Beck#AL2200MES-5V...	
	Feedback type string		0: Commutation motorf...	
	Feedback use		0: Positive direction	
	Feedback direction			
	rsvd			
	Power settings			
	Process channel			
	Parameter channel			
	Manufacturer limits settings			
	Feedback options			
	rsvd			
P-0-0154	Feedback 1 reference signal			

At the bottom, a status bar shows various diagnostic codes and states for Channel A, including 'AxisState', 'Diag Code', 'Diag Msg', 'Umain OK', 'DcLink OK', 'Ampl. Te...', 'Actual op...', 'v <= v_0', 'Positive c...', 'Negative ...', and 'Periph. Vo...'.

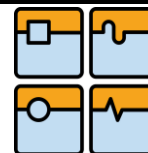
Obr. 67 Nastavení odměřování



Obr. 69 Chyba 0xFD15



Obr. 68 Chyba 0xF4A5



ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout program pro řízení osy s lineárním motorem. Nejprve však bylo nutné lineární osu mechanicky uspořádat a elektricky zapojit.

Při mechanickém uspořádání se vycházelo z původního stavu osy, který nebyl provozu schopný, a z požadavků na konstrukci vyplývajících z parametrů motoru a ostatních komponent osy. Jako první byl při návrhu konstrukce osy vytvořen model, podle kterého se posléze osa upravila. Aby byla osa v provozuschopném stavu, bylo zapotřebí konstrukci doplnit o několik prvků, či některé prvky předělat. Konkrétně předělat nosnou část spojující vedení a lineární motor. Dále k nosné části vyrobit jak držák magnetického odměřovacího systému, tak i držák optického odměřovacího systému. Na osu bylo také potřeba doplnit čela a k nim i tlumiče. Nakonec se vyrobily držáky pro indukční snímače a jejich spínač připevněný k nosné části.

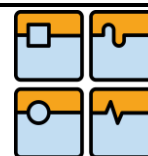
Elektrické zapojení je realizováno tak, aby zajišťovalo napájení lineárního motoru, odměřování polohy, tepelnou ochranu motoru a zapojení koncových indukčních spínačů. Všechny komponenty, které zajišťují zmíněné funkce, jsou zapojeny do servoměniče. Ten je přes sběrnici spojen s průmyslovým počítačem, který je ovládán z jiného vzdáleného počítače.

Řízení osy bylo naprogramováno v systému TwinCAT, konkrétně v modulu PLC Control. V době kdy byl PLC program vytvářen, nebyla osa s lineárním motorem schopna provozu. Takže byl program optimalizován na lineární ose s krokovým motorem. PLC program podle požadavků umožňuje jednak řízení osy v ručním režimu, tak i automatické řízení podle NC kódu v NC režimu. Je psán v programovacím jazyce strukturovaný text. Vizualizace programu je koncipována, tak aby se dala ovládat i z dotykové obrazovky, takže jsou všechny tlačítka dostatečně veliká, a v případě potřeby zadávání hodnot se zobrazí klávesnice nebo číselník. Vizualizace nejenom, že umožňuje ovládání osy, ale i zobrazuje aktuální informace o stavu osy.

Po konfiguraci všech potřebných komponent se přistoupilo k pokusu o oživení osy. Zde se objevil problém s chybou v některém z parametrů nastavení. Byla tak požádána o pomoc technická podpora. Komunikace s ní však byla velmi pomalá a v čase vyměřeném pro zpracování této diplomové práce se nepodařilo osu oživit. Cíle diplomové práce však splněny byly. Osa s lineárním motorem je mechanicky i elektricky uspořádaná, řídicí program byl odzkoušen na jiné ose, a je funkční.

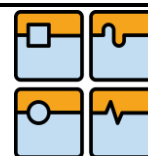
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PAVELKA, Jiří a Jiří ZDĚNEK. *Elektrické pohony a jejich řízení*. Praha: České vysoké učení technické, 2010, 241 s. ISBN 978-80-01-04642-5.
- [2] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006, 139 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [3] PISKAČ, Luděk. *Elektrické pohony: principy a funkce*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003, 118 s. ISBN 80-7082-970-2.
- [4] Linear Motor Basics. *Production machining* [online]. 2008 [cit. 2014-10-08]. Dostupné z: <http://www.productionmachining.com/articles/linear-motor-basics>
- [5] Lineární motory. VUES Brno s.r.o.. [online]. [cit. 2014-10-08]. Dostupné z: http://www.vues.cz/file/424/CZ_LIN-OBECNE_020909.pdf
- [6] Energie für neues Denken. [online]. 2014 [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: http://biowasserstoff-magazin.richey-web.de/pdf/Themen_Elektromotoren.pdf
- [7] Lineární pohony. [on-line]. [cit. 2014-10-08]. Dostupný z: https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/prezentace/elektricke_stroje/4_rocnik/linear_motor.pps
- [8] KÜNSTLER, Viktor. Drátové řezačky s lineárními pohony v ekonomické třídě. *MMSpektrum* [on-line]. 2010 [cit. 2014-10-08]. Dostupný z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/dratove-rezacky-s-linearnimi-pohony-v-ekonomicke-tride.html>
- [9] BARRETT, Jack, Tim HARNED a Jim MONNICH. Linear Motor Basics. PARKER HANNIFIN CORPORATION. [online]. [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <http://www.parkermotion.com/whitepages/linearmotorarticle.pdf>
- [10] DONOHUE, Barbara. How it Works – The Line on Linear (Motors). *Today's Machining World* [online]. 2010 [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <http://todaysmachiningworld.com/magazine/the-line-on-linear-how-linear-motor-works/>
- [11] Linear motors. MOOG. [on-line]. [cit. 2014-10-10]. Dostupný z: <http://www.moog.com/products/motors-servomotors/linear-motors/>
- [12] HYATT, Greg. Ballscrews or Linear Motors?. *MAKINO* [online]. [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <http://www.makino.com/about/news/ballscrews-or-linear-motors/124/>
- [13] KAVÁN, Martin. Lineární motor versus kuličkový šroub. HIWIN. *Propohony* [on-line]. [cit. 2014-10-10]. Dostupný z: <http://www.propohony.cz/linearni-motory/145-linearni-motor-versus-kulickovy-sroub>



- [14] Lineární motory - špičková technologie v polohování. HIWIN. *Propohony* [on-line]. [cit. 2014-10-10]. Dostupný z: <http://www.propohony.cz/linearni-motory/191-linearni-motory-spikova-technologie-v-polohovani>
- [15] DEHART, Sean, Smriti CHOPRA a Hannes DAEPP. Motors. [on-line]. [cit. 2014-10-11]. Dostupný z: http://ume.gatech.edu/mechatronics_course/Motors_F09.ppt
- [16] Герасимов, Илья. Современные тенденции в развитии линейных сервоприводов. [on-line]. 2012 [cit. 2014-10-11]. Dostupný z: <http://konstruktor.net/podrobnее-elekt/items/sovremennye-tendencii-v-razvitii-linejnyx-servoprivodov.html>
- [17] Princip - Lineární motor. [on-line]. [cit. 2014-10-12]. Dostupný z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/linearni-motor>
- [18] Trilogy linear motor & Linear motor positioners. PARKER HANNIFIN CORPORATION. [online]. [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: http://www.parkermotion.com/pdfs/Trilogy_Catalog.pdf
- [19] Data sheet: RELM high accuracy linear encoder. RENISHAW. [online]. [cit. 2014-10-13]. Dostupné z: <http://resources.renishaw.com/en/details/data-sheet-relm-high-accuracy-linear-encoder--41582>
- [20] Linear motors. HIWIN. [online]. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.hiwin.com/html/linear%20motors/index.html>
- [21] Osy s lineárním motorem. HIWIN. [online]. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.hiwin.cz/cz/produkty/polohovaci-systemy/kompletni-polohovaci-osy/osy-s-linearnim-motorem>
- [22] Lineární motory. VUES Brno s.r.o.. [online]. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: http://www.vues.cz/cs/produkty/servomotory_a_linearni_motory/linearni_motory
- [23] BECKHOFF. *Beckhoff Information system*. [online]. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.beckhoff.com/>
- [24] FANUC. *Firemní stránky*. [online]. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.fanucfa.cz/cz-cz/Home>
- [25] SVOBODA, Ondřej. Obráběcí centrum nejen s působivým designem. *MMspektrum* [on-line]. 2010 [cit. 2015-03-25]. Dostupný z: http://www.misan.cz/download/mazak/2010-03-mm/MM_03_2010_Misan.pdf
- [26] Hyper Variaxis 630. MAZAK. [online]. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.mazak.eu/Multi-tasking-machines/Hyper-Variaxis-630>
- [27] VZ300L. SODICK. [online]. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: <http://www.sodick.com/products/wireedm/vz300l.htm>

- [28] Linear servomotor AL2xxx. BECKHOFF. [online]. [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: http://download.beckhoff.com/download/Document/Drives/AL2000_BA_en.pdf
- [29] Designing your Application with AL2000. BECKHOFF. [online]. [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: http://download.beckhoff.com/download/Document/Drives/AL2000_Application_en.pdf
- [30] Caged Ball LM Guide, SSR. THK. [on-line]. [cit. 2015-04-08]. Dostupný z: http://www.thk.ru/cataloguespdf/212E_SSR.pdf
- [31] Advantages of Caged Ball Technology, SSR. THK. [on-line]. [cit. 2015-04-08]. Dostupný z: <http://www.thk.ru/cataloguespdf/212-8essr.pdf>
- [32] Magnetic Encoder System (MES) for linear Motors AL2xxx. BECKHOFF. [on-line]. [cit. 2015-04-09]. Dostupný z: http://download.beckhoff.com/download/Document/Drives/MES_documentation_en.pdf
- [33] RGH24 series readhead. RENISHAW. [on-line]. [cit. 2015-04-09]. Dostupný z: <http://resources.renishaw.com/download.aspx?lang=en&data=55407&btn=1>
- [34] RGS20-S, RGS20-PC, RGS40-S, RGS40-PC scale. RENISHAW. [on-line]. [cit. 2015-04-09]. Dostupný z: <http://resources.renishaw.com/en/download/data-sheet-rgs20-s-rgs20-pc-rgs40-s-rgs40-pc-scale--25222>
- [35] Inductive Proximity Switch IH020BK41VB. WENGLOR. [on-line]. [cit. 2015-04-11]. Dostupný z: <http://www.sensor.si/data/pdf/induktivna/IH020BK41VB.pdf>
- [36] Inductive sensors. WENGLOR. [on-line]. [cit. 2015-04-11]. Dostupný z: <https://www.wenglor.com/index.php?id=929>
- [37] Control Cabinet PCs C6920, C6925. BECKHOFF. [on-line]. [cit. 2015-04-15]. Dostupný z: ftp://download.beckhoff.com/Document/IndustPC/C6920_C6925en.pdf
- [38] MAREK, Jiří. Drátové Odměřování lineární polohy u obráběcích strojů. *Automa*. [on-line]. 2014 [cit. 2015-04-15]. Dostupný z: <http://automa.cz/res/pdf/52629.pdf>
- [39] ZEŽULKA, František a Ondřej HYNČICA. Průmyslový Ethernet IX: EtherNet/IP, EtherCAT. *Automa*. [on-line]. 2008 [cit. 2015-04-16]. Dostupný z: http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~zezulka/download/KPPA/A10_08s60_IX.pdf
- [40] Servo Drives AX5000. BECKHOFF. [on-line]. [cit. 2015-04-17]. Dostupný z: https://wiki.gsi.de/foswiki/pub/Epics/IndustrialControlsEpicsBeckhoffMotorControls/AX5000Usermanual_en.pdf



[41] Návod k obsluze. BOW. [on-line]. [cit. 2015-04-25]. Dostupný z: http://bow.cz/getfile.php?type=pagedata/sortiment/soubory_ke_stazeni/&name=bf20v-bf20l-cz.pdf&action=get

[42] 2-Phase Stepping Motors. AUTOMATION TECHNOLOGY. [on-line]. [cit. 2015-04-25]. Dostupný z: <http://www.automationtechnologiesinc.com/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=7>


SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Princip lineárního motoru [6]	9
Obr. 2 Dvojice lineárních motorů [8]	10
Obr. 3 Porovnání ustavení zařízení [13]	11
Obr. 4 Princip lineárního asynchronního motoru [7]	12
Obr. 5 Mechanická charakteristika LAM [7]	13
Obr. 6 Mechanická charakteristika LSM [7]	13
Obr. 7 LSM se železným jádrem [15]	14
Obr. 8 LSM bez feromagnetických materiálů [15]	14
Obr. 9 Plochý LSM [15]	15
Obr. 10 Tubulární lineární motor [16]	16
Obr. 11 Krokový lineární motor [17]	16
Obr. 12 Příslušenství lineárního motoru [18]	17
Obr. 13 Optický odměřovací systém [19]	18
Obr. 14 Lineární osa řady LMU160 [21]	19
Obr. 15 L7S s krytím IP67 [22]	19
Obr. 16 Produkty FANUC [24]	20
Obr. 17 Hyper Variaxis 630 [26]	20
Obr. 18 VZ300L [8]	20
Obr. 19 AL2403–0001–0000 FLEX	21
Obr. 20 Štítek motoru AL2403–0001–0000 FLEX	22
Obr. 21 Mechanická charakteristika motoru AL2403–0001–0000 FLEX [29]	22
Obr. 22 Struktura vedení SSR [30]	23
Obr. 23 Čtecí hlava MES [28]	24
Obr. 24 Lineární motor a MES [28]	24
Obr. 25 Optický odměřovací systém RGH24 [33]	25
Obr. 26 Indukční snímač IH020BK41VB [35]	26
Obr. 27 Původní konstrukce lineární osy	27
Obr. 28 Model lineární osy	27
Obr. 29 Model lineární osy – popis	28
Obr. 30 Nosná část	29
Obr. 31 Lineární osa	30
Obr. 32 Čelo lineární osy	30
Obr. 33 Model lineární osy s energetickým řetězem	31
Obr. 34 Schéma elektrického zapojení	32
Obr. 35 Průmyslové PC C6925 [23]	33
Obr. 36 Blokové schéma vlečné regulace [38]	34
Obr. 37 Popis servoměniče AX5106 [23]	36
Obr. 38 Propojovací krabice AL2250	37
Obr. 39 Kabel motoru ZK4500-0023 [23]	38

Obr. 40 Kabel odměřovacího systému ZK4510-0020 [23]	38
Obr. 41 Cyklus na klasickém PLC	39
Obr. 42 Cyklus na softwarovém PLC	39
Obr. 43 PLC a NC cyklus [23]	40
Obr. 44 Moduly TwinCATu [23]	40
Obr. 45 TwinCAT System Manager [23]	42
Obr. 46 Příklad – instruction list [23]	43
Obr. 47 Příklad – structured text [23]	43
Obr. 48 Příklad – function block diagram [23]	44
Obr. 49 Příklad – ladder diagram [23]	44
Obr. 50 Příklad – continuous function chart [23]	45
Obr. 51 Příklad – sequential function chart [23]	45
Obr. 52 OPTI BF20 Vario – křížový stůl	47
Obr. 53 Charakteristika motoru 23H280-01EA [42]	47
Obr. 54 Program MAIN	50
Obr. 55 Funkční blok MC_Power [23]	51
Obr. 56 Hlavní ovládací panel vizualizace	52
Obr. 57 Funkční blok MC_JOG [23]	53
Obr. 58 Ovládací panel pro ruční řízení osy	54
Obr. 59 Blokové schéma NC řízení	55
Obr. 60 Ovládací panel pro NC řízení osy	58
Obr. 61 Ovládací panel v chybovém stavu	58
Obr. 62 Nastavení motoru a odměřování	59
Obr. 63 Propojení NC osy s měničem	60
Obr. 64 Struktura nastavení	60
Obr. 65 Připojení PLC projektu	61
Obr. 66 Spojení proměnné PlcToNc s interpolačním kanálem	61
Obr. 67 Nastavení odměřování	62
Obr. 68 Chyba 0xF4A5	63
Obr. 69 Chyba 0xFD15	63

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Srovnání lineárních synchronních motorů [9, 15]	15
Tab. 2 Přehled mechanických vedení podle rychlostí [3]	17
Tab. 3 Technická data lineárního motoru AL2403-0001-0000 FLEX [29]	22
Tab. 4 Technická data vedení SSR 20XW[30]	23
Tab. 5 Technická data magnetického odměřovacího systému [32]	24
Tab. 6 Technická data RGH24D a RGS20-S [33, 34]	25
Tab. 7 Technická data indukčního snímače IH020BK41VB [35]	26
Tab. 8 Technická data servoměniče AX5106 [23]	35
Tab. 9 Zapojení odměřovacího systému do servoměniče [40]	37
Tab. 10 Knihovny použité v projektu pro řízení osy [23]	48
Tab. 11 Použité datové typy [23]	49
Tab. 12 Vybrané funkce G-kódu [23]	56

Str. 70	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Model osy s lineárním motorem

Příloha 2 – Ukázka funkce PLC programu

Příloha 3 – TwinCAT zdrojový kód

Příloha 4 – Poster